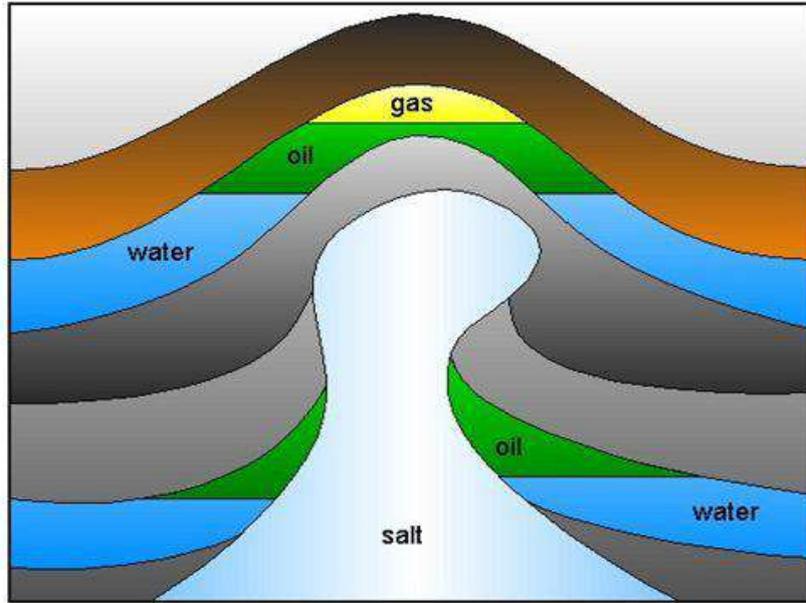




الجامعة السورية الخاصة
SYRIAN PRIVATE UNIVERSITY

الجمهورية العربية السورية
وزارة التعليم العالي
الجامعة السورية الخاصة
كلية هندسة البترول

خزانات (مكامن) الغاز الطبيعي



تأليف الدكتور المهندس

أمين أحمد شقوف

المحتويات

الصفحة	الموضوع
١٠	الفصل الأول : الخصائص الفيزيائية والكيميائية للغاز الطبيعي
١٠	١-١- التركيب الكيميائي للغاز الطبيعي
١١	٢- الصفات الفيزيائية للغاز الطبيعي
١١	١-٢-١- الوزن الجزيئي الظاهري
١٢	١-٢-٢- كثافة الغاز
١٢	١-٢-٣- عامل انضغاط الغاز
١٦	١-٢-٤- انضغاطية الغاز
١٨	١-٢-٥- عامل حجم الغاز
١٨	١-٢-٦- لزوجة الغاز
٢٠	١-٣- هيدرات الغاز
٢٧	الفصل الثاني: طرق استثمار المكامن الغازية
٢٧	مقدمة
٢٩	١-٢- انظمة عمل المكامن الغازية
٢٩	١-٢-١- نظام العمل ذو الدفع الغازي
٢٩	١-٢-٢- نظام العمل ذو الدفع المائي
٢٩	٢-٢- تنظيم استثمار المكامن الغازية
٣٠	٢-٣- ادائية المكنم الغازي
٣٠	٢-٣-٢- الخصائص الفيزيائية للصخور المكنمية
١٠	٢-٣-٢-١- مسامية الصخور
٣١	٢-٣-٢-٢- انضغاطية الصخور
٣٢	٢-٣-٢-٣- نفوذية الصخور
٣٢	٢-٣-٢-٤- المياه المترابطة
٣٣	٢-٣-٢-٥- الانضغاطية الكلية
٣٣	٢-٣-٣- جريان الغاز المكنمي
٣٣	٢-٣-٣-١- جريان الحالة المستقرة
٣٥	٢-٣-٣-٢- جريان الحالة غير المستقرة

٣٩	٢-٣-٣-٣- جريان الحالة المستقرة الزائفة
٤٢	٢-٤- تطوير حقول الغاز
٤٤	٢-٤-١- نمط تطوير حقول الغاز
٤٥	٢-٥-٢-٥- العوامل المحددة لطبيعة العلاقة (P/Z) وكمية الغاز المنتجة
٤٧	٢-٦- انظمة توزيع الآبار وميزاتها عند استثمار المكمن الغازي
٤٩	٢-٧- عامل المردود الغازي
٥١	٢-٨- انظمة استثمار الحقول الغازية متعددة الطبقات
٥٤	٢-٩- طرق زيادة انتاج ابار الغاز
٥٥	٢-٩-١- الطريقة الفيزيوكيميائية
٥٩	٢-٩-٢- الطريقة الميكانيكية
٥٩	٢-٩-٣- الطريقة المركبة
٦١	الفصل الثالث : بحث الآبار الغازية
٦١	٣-١- الهدف من بحث الآبار الغازية
٦١	٣-٢- اختبار بئر الغاز الطبيعي حسب نظرية الحالة المستقرة
٦٤	٣-٢-١- اختبار معدلات الجريان المتعاقبة
٦٥	٣-٢-٢- اختبار الفترات الزمنية المتساوية
٦٧	٣-٢-٣- اختبار الفترات الزمنية المتساوية(الاختبار المعدل)
٦٩	٣-٢-٤- زمن الاستقرار
٧١	٣-٣- اختبار بئر الغاز الطبيعي حسب نظرية الحالة غير المستقرة
٧١	٣-٣-١- اختبار انخفاض الضغط
٧٢	٣-٣-٢- اختبار استعادة الضغط
٧٤	٣-٤- التصريف
٧٤	٣-٤-١- تصريف المكمن
٧٦	٣-٤-٢- تحديد قدرة تجهيزات البئر
٧٦	٣-٤-٢-١- قدرة مواسير التغليف
٧٧	٣-٤-٢-٢- قدرة خط الجريان
٧٧	٣-٤-٢-٣- قدرة خط الإنتاج
٧٧	٣-٤-٣- توقع ادائية المكمن
٨١	٣-٥- التحليل باستخدام الضغط الزائف للغاز الحقيقي

	الفصل الرابع
٨٦	حساب الاحتياطي للمكامن الغازية
٨٦	٤-١- حساب احتياطي الغاز بالطريقة الحجمية
٨٨	٤-٢- حساب احتياطي الغاز بطريقة الموازنة المادية
٩٠	٤-٢-١- نموذج بوت
٩١	٤-٣- مخططات الطاقة
٩٢	٤-٤- المكامن المضغوطة بشكل غير عادي (ذات ضغوط شاذة)
٩٩	المصطلحات العلمية
٩٩	المراجع العلمية

الرموز والواحدات

الرمز	الواحدة المستخدمة	دلالة الرمز
A	ft^2	مساحة منطقة التصريف
AOF	$Mscfd$	أقصى معدل للجريان المفتوح
B	$\frac{Psia^2 / cp}{Mscfd}$	معامل جريان دارسي في معادلات الجريان (تحذف cp من الواحدة عند استخدام $\Delta(p)^2$ بدلا من $m(p)$)
B_g	$\frac{res.cf}{s.cf}$	عامل حجم الغاز
B_{gi}	$\frac{res.cf}{s.cf}$	عامل حجم الغاز عند الضغط الأولي للمكمن
B_{ga}	$\frac{res.cf}{s.cf}$	عامل حجم الغاز عند الضغط النهائي للمكمن
B_w	$\frac{res.cf}{s.cf}$	عامل حجم الماء
C	$\frac{Mscfd}{Psia^{2n} / cp}$	معامل التصريف في منحنى التصريف المستقر لبئر الغاز (تحذف cp من الواحدة عند استخدام $\Delta(p)^2$ بدلا من $m(p)$)
C_A	<i>Dimensionless</i>	عامل يتعلق بهندسية المكمن (شكل المكمن)
C_i	$\frac{Mscfd}{Psia^{2n} / cp}$	معامل تصريف البئر (i) (تحذف cp من الواحدة عند استخدام $\Delta(p)^2$ بدلا من $m(p)$)
C_g	$Psia^{-1}$	انضغاطية الغاز عند ثبات درجة الحرارة
C_o	$Psia^{-1}$	انضغاطية النفط
C_{pr}	<i>Dimensionless</i>	الانضغاطية شبه المصغرة (المصغرة الزائفة) لخليط الغاز
C_r	<i>Dimensionless</i>	الانضغاطية المصغرة للغاز
C_R	$Psia^{-1}$	انضغاطية الجزء الصخري من المكمن
C_{res}	$\frac{Mscfd}{Psia^{2n} / cp}$	معامل تصريف المكمن (تحذف cp من الواحدة عند استخدام $\Delta(p)^2$ بدلا من $m(p)$)
C_t	$Psia^{-1}$	الانضغاطية الكلية
C_{ti}	$Psia^{-1}$	الانضغاطية الكلية عند الضغط الأولي للمكمن
C_w	$Psia^{-1}$	انضغاطية الماء
d	ft	القطر الداخلي لمواسير الإنتاج

D	$(Mscfd)^{-1}$	معامل الاضطراب
e	$^{\circ}F$	معامل تصحيح
e	ft	الخشونة المطلقة
e/d	<i>Dimensionless</i>	الخشونة النسبية
E	$\%$	عامل كفاءة خط نقل الغاز
E_g	$\%$	عامل مردود الغاز
F	$\frac{Psia^2 / cp}{(Mscfd)^2}$	معامل الجريان اللادارسي في معادلات الجريان (تحذف cp من الواحدة عند استخدام $\Delta(p)^2$ بدلا من $m(p)$)
f	<i>Dimensionless</i>	عامل الاحتكاك
G	$MMscf$	كمية الغاز الابتدائي المتواجد في المكمن
G_p	$MMscf$	الكمية التراكمية للغاز المنتج
G_{pd}	$MMscf$	كمية الغاز القابلة للاستثمار
h	ft	السماكة الفعالة للطبقة المنتجة
H	ft	عمق البئر
k	md	النفوذية المطلقة
k_g	md	النفوذية الفعالة للغاز
L	ft	الطول
m	$\frac{Psia^2 / cp}{\log cycle}$	ميل الجزء المستقيم لمنحني استعادة الضغط (تحذف cp من الواحدة عند استخدام ΔP^2 بدلا من $m(p)$)
M_a	$\frac{lbm}{lb - mole}$	الوزن الجزيئي الظاهري لخليط الغاز
M_{air}	$\frac{lbm}{lb - mole}$	الوزن الجزيئي الظاهري للهواء
m_g	lbm	كتلة الغاز
M_g	$\frac{lbm}{lb - mole}$	الوزن الجزيئي للغاز
M_{gi}	$\frac{lbm}{lb - mole}$	الوزن الجزيئي للمركب (i) في خليط الغاز
$m(p)$	$Psia^2 / cp$	الضغط الزائف للغاز الحقيقي
$m(\bar{P}_R)$	$Psia^2 / cp$	الضغط الزائف للغاز الحقيقي المقابل للضغط (\bar{P}_R)
$m(P_{wf})$	$Psia^2 / cp$	الضغط الزائف للغاز الحقيقي المقابل للضغط (P_{wf})

$m(P_{ws})$	$Psia^2 / cp$	الضغط الزائف للغاز الحقيقي المقابل للضغط (P_{ws})
$m(p)_D$	<i>Dimensionless</i>	الضغط الزائف اللابعدي
n	<i>Dimensionless</i>	المؤشر الأسّي لمعادلة التصريف المستقر لبئر الغاز ($n=1/Slope$)
n	<i>Lb-mole</i>	إجمالي عدد المولات في المعادلة العامة للغازات
n_i	<i>Lb-mole</i>	عدد مولات المركب (i) في خليط الغاز
N	<i>Dimensionless</i>	عدد مرات القياس، عدد الآبار
$NACL$	<i>PPM</i>	كمية ملح كلور الصوديوم المنحلة في المياه الطبقيّة
N_{Re}	<i>Dimensionless</i>	عدد رينولدز
P	<i>Pisa</i>	الضغط المطلق
P_2, P_1	<i>Pisa</i>	الضغط عند النقطتين (١ و ٢) على الترتيب
P_a	<i>Pisa</i>	الضغط النهائي (ضغط الهجر)
P_C	<i>Pisa</i>	الضغط الحرج للغاز
P_{Ci}	<i>Psia</i>	الضغط الحرج للمركبة (i) في خليط الغاز
P_D	<i>Dimensionless</i>	الضغط اللابعدي
P_{dis}	<i>Psia</i>	ضغط طرد الضاغط
P_e	<i>Pisa</i>	الضغط عند الحدود الخارجية للمكمن
P_i	<i>Pisa</i>	الضغط الابتدائي (الأولي) للمكمن
P_{pc}	<i>Pisa</i>	الضغط شبه الحرج (الحرج الزائف) لخليط الغاز
P_{pc}^*	<i>Pisa</i>	الضغط شبه الحرج (الحرج الزائف) المصحح لخليط الغاز
P_{pr}	<i>Dimensionless</i>	الضغط شبه المصغر (المصغر الزائف) لخليط الغاز
P_{pn}	<i>Psia</i>	الضغط الزائف المعدل لخليط الغاز
ΔP_D	<i>Dimensionless</i>	فرق الضغط اللابعدي
P^O	<i>Pisa</i>	ضغط إسناد اختياري، يختار عادة مساو للقيمة الأدنى لمجال الضغط موضوع الدراسة خلال فترة الاختبار، والضغط الأساسي الأكثر سهولة هو: $P^O = 0$
P_{1hr}	<i>Pisa</i>	الضغط بعد ساعة من الإغلاق ($\Delta t = 1hr$) على منحنى هورنر
P_r	<i>Dimensionless</i>	الضغط المصغر للغاز
\bar{P}_R	<i>Pisa</i>	متوسط ضغط المكمن
P_{sc}	<i>Pisa</i>	الضغط عند الشروط القياسية

P_{sep}	<i>Pisa</i>	ضغط الفاصل
P_t	<i>Pisa</i>	الضغط عند الزمن (t)
P_{tD}	<i>Dimensionless</i>	قيمة الضغط اللابعدي عند الزمن اللابعدي (t_D)
P_{tf}	<i>Pisa</i>	الضغط الجرياني لمواسير الإنتاج
P_{ts}	<i>Pisa</i>	الضغط الساكن لمواسير الإنتاج
P_w	<i>Pisa</i>	ضغط قاع البئر
P_{wf}	<i>Pisa</i>	ضغط قاع البئر الجرياني
P_{ws}	<i>Pisa</i>	ضغط قاع البئر الساكن
$\Delta(p)^2$	<i>psia^2</i>	فرق مربع الضغط
q	<i>Mscfd</i>	معدل الجريان أو معدل الإنتاج
q_{avg}	<i>Mscfd</i>	معدل الإنتاج الوسطي للمكمن
q_D	<i>Dimensionless</i>	معدل الإنتاج اللابعدي
q_{res}	<i>Mscfd</i>	معدل إنتاج المكمن
q_{sc}	<i>Mscfd</i>	معدل الإنتاج أو الجريان عند الشروط القياسية
q_w	<i>Mscfd</i>	معدل إنتاج الماء
Q_{tD}	<i>Dimensionless</i>	الإنتاج التراكمي اللابعدي
r	<i>ft</i>	نصف القطر الشعاعي
r_d	<i>ft</i>	نصف قطر تصريف البئر
r_D	<i>Dimensionless</i>	نصف القطر الشعاعي اللابعدي
r_e	<i>ft</i>	نصف قطر الحدود الخارجية للمكمن
r_{De}	<i>Dimensionless</i>	نصف قطر الحدود الخارجية للمكمن اللابعدي
r_{Dw}	<i>Dimensionless</i>	نصف قطر البئر اللابعدي
r_w	<i>ft</i>	نصف قطر البئر
R	$\frac{Psia.scf}{lb - mole.^{\circ}R}$	الثابت العام للغازات
S	<i>Dimensionless</i>	معامل الظاهرة السطحية
S'	<i>Dimensionless</i>	معامل الظاهرة السطحية الكلي
s_g	<i>%</i>	درجة التشبع بالغاز
s_{gi}	<i>%</i>	درجة التشبع الأولية بالغاز

s_{ga}	%	درجة التشبع النهائية بالغاز
s_o	%	درجة التشبع بالنفط
s_w	%	درجة التشبع بالماء
s_{wc}	%	درجة التشبع بالمياه المتبقية
t	hr	الزمن
t_D	Dimensionless	الزمن اللابعدي
t_s	hr	الزمن اللازم لاستقرار البئر
t_{in}	Dimensionless	مقلوب درجة الحرارة شبه المصغرة ($t_{in} = 1/T_{pr}$)
t_{DA}	Dimensionless	الزمن اللابعدي المستند إلى مساحة التصريف (A)
t_{De}	Dimensionless	الزمن اللابعدي المستند إلى نصف القطر (r_e)
t_{Dw}	Dimensionless	الزمن اللابعدي المستند إلى نصف قطر البئر (r_w)
t_p	hr	زمن التدفق قبل الإغلاق
t_{pn}	hr	الزمن الزائف المعدل
t_{pseudo}	hr	الزمن الزائف
Δt	hr	زمن الإغلاق
T	$^{\circ}R$	درجة الحرارة المطلقة
T_l	$^{\circ}R$	درجة حرارة الغاز عند خط سحب الضاغط
T_C	$^{\circ}R$	درجة الحرارة الحرجة
T_{Ci}	$^{\circ}R$	درجة الحرارة الحرجة للمركبة (i) في خليط الغاز
T_f	$^{\circ}R$	درجة حرارة الطبقة
T_{pc}	$^{\circ}R$	درجة الحرارة شبه الحرجة (الحرجة الزائفة) لخليط الغاز
T_{pc}^*	$^{\circ}R$	درجة الحرارة شبه الحرجة (الحرجة الزائفة) المصححة لخليط الغاز
T_{pr}	Dimensionless	درجة الحرارة شبه المصغرة (المصغرة الزائفة) لخليط الغاز
T_r	Dimensionless	درجة الحرارة المصغرة للغاز
T_{sc}	$^{\circ}R$	درجة الحرارة عند الشروط القياسية
T_{tf}	$^{\circ}R$	درجة حرارة مواسير الإنتاج الجريانية
T_{ts}	$^{\circ}R$	درجة حرارة مواسير الإنتاج الساكنة
V	scf	الحجم

V_i	<i>scf</i>	حجم المكمن الغازي
V_{sc}	<i>scf</i>	الحجم بالشروط القياسية
v	<i>ft / hr</i>	سرعة جريان المائع
W	<i>HP / MMscfd</i>	استطاعة الضاغط
W_e	<i>scf</i>	كمية المياه الداخلة إلى المكمن
y_i	<i>Fraction</i>	الكسر المولي للمركبة (<i>i</i>) في خليط الغاز
y_{co2}	<i>Fraction</i>	الكسر المولي لغاز ثاني أكسيد الكربون
y_{N2}	<i>Fraction</i>	الكسر المولي لغاز الازوت
y_{H2S}	<i>Fraction</i>	الكسر المولي لغاز كبريت الهيدروجين
Z_a	<i>Dimensionless</i>	عامل انضغاط الغاز عند الضغط النهائي (P_a)
Z_i	<i>Dimensionless</i>	عامل انضغاط الغاز عند الضغط الأولي (P_i)
Z	<i>Dimensionless</i>	عامل انضغاط الغاز
Z_{sc}	<i>Dimensionless</i>	عامل انضغاط الغاز بالشروط القياسية
α	<i>Deg</i>	زاوية
β	<i>ft⁻¹</i>	معامل السرعة
γ_g	<i>Dimensionless</i>	الكثافة النسبية للغاز بالنسبة للهواء
μ	<i>cp</i>	لزوجة المائع
μ_g	<i>cp</i>	لزوجة الغاز
μ_{gi}	<i>cp</i>	لزوجة الغاز عند الضغط الأولي للمكمن (P_i)
ρ_{air}	<i>lbm / cf</i>	كثافة الهواء الجاف المحسوبة بالشروط القياسية
ρ_g	<i>lbm / cf</i>	كثافة الغاز
ρ_r	<i>Dimensionless</i>	الكثافة المصغرة للغاز
ρ_{sc}	<i>lbm / cf</i>	كثافة الغاز عند الشروط القياسية
ϕ	<i>%</i>	المسامية

الفصل الأول

الخصائص الفيزيائية والكيميائية للغاز الطبيعي

١-١- التركيب الكيميائي للغاز الطبيعي: (*Composition Of Natural Gas Chemical*)

يتكون الغاز الطبيعي من الهيدروكربونات الغازية بالإضافة إلى بعض الشوائب، أما الهيدروكربونات الغازية الموجودة في الغاز الطبيعي فهي: الميثان، الايثان، البروبان، البوتان، البنتنان، مع كمية قليلة من الهكسان والهبتان والاوكتان والهيدروكربونات الأثقل. تصنف المركبات الأثقل من الهبتان بما يسمى فوق الهبتان (*Heptanes Plus*) أو (C_7^+)، و الشوائب الموجودة في الغاز الطبيعي هي: غاز الازوت، غاز ثاني أو أكسيد الكربون، غاز كبريت الهيدروجين، الهليوم، النيون الارغون وغيرها، كما تتضمن الملوثات بخار الماء أيضاً، ويمكن أن يختلف التركيب الحقيقي للغاز الطبيعي بمجالات واسعة، حتى انه قد يختلف في بئرين لإنتاج الغاز من ذات الممكن .

يمكن تصنيف الغاز الطبيعي المنتج حسب تركيبه الكيميائي إلى الأنواع التالية:

١- الغاز الحلو (*Sweet Gas*): وهو الغاز الذي لا يحتوي في تركيبه إلا نسبة قليلة جداً من كبريت الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون، ولا يحتاج إلى معالجة، ويمكن أن يستعمل مباشرة كوقود .

٢- الغاز الحامضي (*Sour Gas*): وهو الغاز الذي يحتوي على كمية معينة من كبريت الهيدروجين و ثاني أكسيد الكربون.

٣- الغاز الرطب (*Wet Gas*): وهو الغاز الذي تنفصل عنه كميات لا بأس بها من المواد الهيدروكربونية السائلة بعد المعالجة المناسبة إضافة إلى احتوائه على نسبة من المياه.

٤- الغاز الجاف (*Dry Gas*): وهو الغاز الذي يتكون بشكل رئيسي من الميثان والايثان ولا يحتوي على كميات كبيرة من المواد الهيدروكربونية الثقيلة ويكون خالياً من الرطوبة .

١-٢- الصفات الفيزيائية للغاز الطبيعي: (Physical Properties Of Natural Gas)

إن فهم سلوكية الغازات بالنسبة لاختلاف كل من الضغط ودرجة الحرارة يتضح جلياً عندما نأخذ بعين الاعتبار سلوكية الغازات في شروط مقارنة للشروط القياسية (Standard Conditions) من الضغط ودرجة الحرارة وهي:

$$P_{sc} = 101.324 \text{ Kpa} = 1 \text{ atm} = 14.7 \text{ Psia}$$
$$T_{sc} = 15.5 \text{ }^\circ\text{C} = 288.7 \text{ }^\circ\text{K} = 60 \text{ }^\circ\text{F} = 520 \text{ }^\circ\text{R}$$

وفي الشروط القياسية يمكن القول: إن الغاز يسلك سلوكاً مثالياً، والقانون العام للغازات هو:

$$P.V = n.R.T \quad (1.1)$$

حيث تمثل (V) المجموع الكلي لحجم (n) مول من الغاز بدرجة حرارة (T) وتحت تأثير ضغط (P) وبما أن (n) تساوي كتلة الغاز (m_g) مقسومة على وزنه الجزيئي (M_g)، لذلك يمكن كتابة المعادلة (1.1) بالشكل التالي:

$$P.V = \frac{m_g}{M_g} \times R.T \quad (1.2)$$

هذه المعادلة محدودة التطبيق لأنه لا يوجد غاز مثالي، ولكنها توضح سلوك أغلب الغازات الحقيقية (Real Gas) عند ضغوط منخفضة، وتعطي الأساس لتطوير معادلات الحالة الغازية الأكثر ملاءمة لوصف سلوكية الغازات الحقيقية عند ضغوط عالية .

R = الثابت العام للغازات وتعتمد قيمه العددية على الوحدات المستخدمة للتعبير عن

درجة الحرارة والضغط والحجم، وفي الوحدات التي سنستخدمها في دراستنا وهي:

الضغط بوحدة $Psia$ ، درجة الحرارة بوحدة $^\circ R$ ، الحجم ft^3 ، عدد المولات بوحدة

$$(lb - mole) \text{ فان قيمته هي: } (R = 10.73 \text{ Psia} \cdot ft^3 / lb - mole \cdot ^\circ R)$$

١-٢-١- الوزن الجزيئي الظاهري: (Apparent Molecular Weight)

بما أن الغاز يتكون من عدة مركبات هيدروكربونية غازية مختلفة الحجم، فإنه ليس

من الدقة القول بأن لخليط الغازات وزن جزيئي، وإنما يعرف بالوزن الجزيئي الظاهري،

ويعرّف كما يلي:

$$M_a = \sum y_i \times M_{gi} \quad (1.3)$$

حيث أن: (y_i) يعطى بالمعادلة التالية:

$$y_i = n_i / \sum n_i \quad (1.4)$$

أي أن خليط المركبات الهيدروكربونية الغازية يتخذ شكلاً وسلوكاً وكأنه مكون من مركبة غازية واحدة، حيث أن وزنها الجزيئي يساوي الوزن الجزيئي الظاهري للخليط الغازي .

١-٢-٢ - كثافة الغاز: (Gas Density)

يرمز لها بالرمز (ρ) وتعبّر عن الكتلة النوعية بوحدة الحجم وتسمى أحياناً بالكثافة الكتلية. تتعلق كثافة الغاز القابل للانضغاط بقيمة الضغط المطبق عليه ودرجة حرارته وتحسب كثافة الغاز الحقيقي من المعادلة العامة للغازات الحقيقية وهي:

$$P.V = Z.n.RT \quad (1.5)$$

$$\rho_g = \frac{P.M_g}{R.T} \cdot \frac{1}{Z} \quad (1.6) \quad \text{وبالتالي نكتب:}$$

تحدد كثافة الغاز الطبيعي عند الشروط القياسية من العلاقة التالية:

$$\rho_{sc} = 0.0763 \times \gamma_g \text{ (air = 1) (lb - m / ft}^3\text{)} \quad (1.7)$$

$$\rho_{air} = 0.0763 \text{ lb / ft}^3 = 0.001225 \text{ g / cm}^3 \quad \text{كثافة الهواء تساوي:}$$

وبمعرفة كثافة الغاز عند الشروط القياسية يمكن تحديد كثافته عند أية قيمة للضغط ودرجة الحرارة بالعلاقة التالية:

$$\rho_g = \frac{\rho_{sc} \cdot P.T_{sc}}{Z.P_{sc} \cdot T} \quad (1.8)$$

تعرف الكثافة النسبية للغاز (Relative Density) بأنها نسبة كثافة الغاز (Gas Density) إلى كثافة الهواء الجاف المحسوبة بالشروط القياسية من الضغط ودرجة الحرارة ويمكن كتابتها كما يلي:

$$\gamma_g = \frac{\rho_g}{\rho_{air}} = \frac{M_g}{M_{air}} = \frac{M_g}{29} \quad (1.9)$$

وفي حال كون الغاز خليطاً فإن المعادلة (1.9) تصبح كما يلي: .

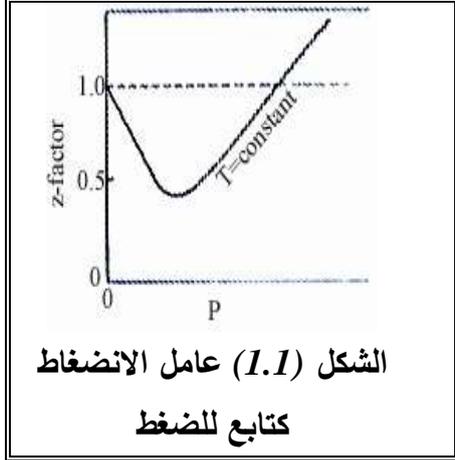
$$\gamma_g = \frac{M_a}{M_{air}} = \frac{M_a}{29} \quad (1.10)$$

١-٢-٣ - عامل انضغاط (انحراف) الغاز: (Gas Compressibility (Deviation) Factor)

يمثل عامل انضغاط الغاز (Z-factor) انحراف سلوك الغازات الحقيقية عن سلوك الغازات المثالية عند تغير الشروط التي تتواجد فيها من ضغط ودرجة حرارة، ويعرف بأنه نسبة الحجم الحقيقي الذي تشغله كتلة الغاز عند قيمة للضغط ودرجة الحرارة إلى الحجم الذي يشغله الغاز إذا ما تصرف كغاز مثالي أي:

$$Z = \frac{V_{actual}}{V_{ideal}} \quad (1.11)$$

حيث أن $(Z=1)$ للغازات المثالية، وتختلف قيمة العامل (Z) للغازات الحقيقية باختلاف تركيب الغاز والضغط ودرجة الحرارة، ويتم حسابه عن طريق التجربة (Experimentally)



حيث تمثل النتائج على شكل مخططات بيانية وعادة تأخذ الهيئة الموضحة بالشكل (1.1)، حيث تكون جزيئات الغاز عند الضغط المنخفض جداً متباعدة نسبياً عن بعضها البعض وتقترب قيمة عامل الانضغاط من الواحد مما يعني تواجد لسلوك الغاز المثالي، تتوفر جداول قيم عامل الانضغاط لأغلب المكونات الأحادية (Single Component) للغازات الهيدروكربونية الخفيفة ولكن نادراً ما يصادف غاز أحادي المركبة،

وللحصول على قيم عامل الانضغاط للغاز الطبيعي يستخدم قانون الحالات المقترنة (Corresponding States) والذي ينص على أنه لكل الغازات النقية عامل الانضغاط ذاته عند ذات القيمة من الضغط ودرجة الحرارة المصغرين (المختزلين) - حيث تعرف القيمة المصغرة (Reduced Value) كما يلي:

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad , \quad P_r = \frac{P}{P_c} \quad (1.12)$$

لقد تبين أن قانون الحالات المقترنة يطبق بشكل أفضل بالنسبة للغازات التي لها صفات جزيئية متشابهة ولحسن الحظ أن أغلب الغازات التي يتعامل معها مهندس النفط تتألف من جزيئات مركبات عضوية (Organic Compounds) من ذات الصنف، تدعى بالهيدروكربونات البارافينية. وبما أنه توجد صعوبة في إيجاد النقطة الحرجة للخليط المتعدد المركبات، فإن الكميات شبه الحرجة (Pseudo Critical) (تسمى أيضاً الحرجة الزائفة) للضغط ودرجات الحرارة اعتبرت معبرة، وتعرف هذه الكميات كما يلي:

$$T_{pc} = \sum y_i \times T_{c_i} \quad , \quad P_{pc} = \sum y_i \times P_{c_i} \quad (1.13)$$

تستخدم هذه الكميات شبه الحرجة لخليط الغازات بذات الطريقة تماماً التي تستخدم فيها الضغوط ودرجات الحرارة الحرجة الحقيقية للغازات النقية، وهي تعبر بشكل فعلي عن

الصفات الحقيقية الحرجة لخليط الغازات، ويمكن حسابها بشكل تقريبي من المعادلات التالية:

$$T_{pc} = 170.5 + 307.3 \times \gamma_g \quad (1.14)$$

$$P_{pc} = 709.6 - 58.7 \times \gamma_g \quad (1.15)$$

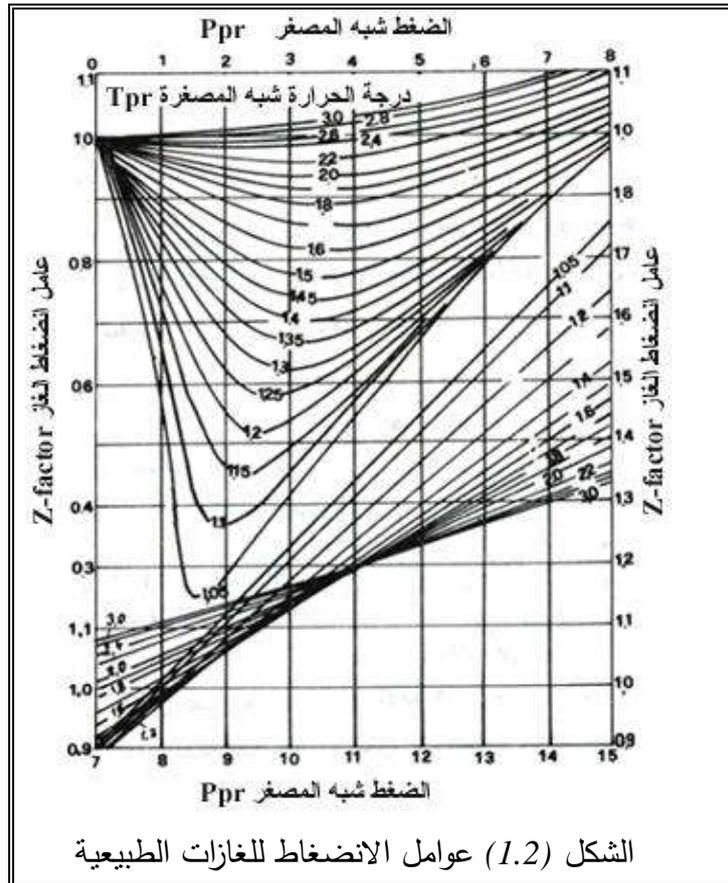
كما توجد أيضاً معادلات تجريبية أخرى لحسابها وهي التالية: [9]

$$T_{pc} = 168 + 325 \times \gamma_g - 12.5 \times \gamma_g^2 \quad (1.16)$$

$$P_{pc} = 677 + 15 \times \gamma_g - 37.5 \times \gamma_g^2 \quad (1.17)$$

بعد ذلك ومن الشكل (1.2) الذي يمثل عامل الانضغاط للغازات الطبيعية يمكن الحصول على قيم عامل الانضغاط للغاز بالعلاقة مع قيم الضغط ودرجة الحرارة شبه المصغرة، والتي تعرّف كما يلي:

$$T_{Pr} = \frac{T}{T_{Pc}} \quad , \quad P_{Pr} = \frac{P}{P_{Pc}} \quad (1.18)$$



بما أن الغازات الطبيعية تحتوي على شوائب غير هيدروكربونية مثل (N_2) و (CO_2) و

(H_2S)، فإنها ستؤثر على قيمة عامل الانضغاط الذي تم الحصول عليه من الشكل (1.2)، ولهذا يجب إجراء تصحيحاً يأخذ بعين الاعتبار تأثير هذه الشوائب، وذلك باستعمال عامل

التصحيح (e) واحدته ($^{\circ}F$) الذي تم شرحه من قبل (Aziz and Wichert) كما يلي:

$$e = 120(y_{CO_2} + y_{H_2S})^{0.9} - 120(y_{CO_2} + y_{H_2S})^{1.6} + 15(y_{H_2S}^{0.5} - y_{H_2S}^4) \quad (1.19)$$

$$T_{Pc}^* = T_{Pc} - e \quad (1.20)$$

$$P_{Pc}^* = \frac{P_{Pc} \times T_{Pc}^*}{T_{Pc} + y_{H_2S}(1 - y_{H_2S}) \times e} \quad (1.21)$$

ولكن عندما يكون تركيز غاز الآزوت كبيراً في المزيج الغازي من المفضل إجراء التصحيح باستخدام طريقة (Carr-Kobayashi-Burrows) كما يلي:

$$T_{Pc}^* = T_{Pc} - 80 \cdot y_{CO_2} + 130 \cdot y_{H_2S} - 250 \cdot y_{N_2} \quad (1.22)$$

$$P_{Pc}^* = P_{Pc} + 440 \cdot y_{CO_2} + 600 \cdot y_{H_2S} - 170 \cdot y_{N_2} \quad (1.23)$$

بعد الحصول على الخصائص شبه الحرجة المصححة نحسب قيمة كل من الضغط ودرجة الحرارة شبه المصغرة كما يلي:

$$P_{Pr} = \frac{P}{P_{Pc}^*}, \quad T_{Pr} = \frac{T}{T_{Pc}^*} \quad (1.24)$$

بعد ذلك نحصل على قيمة (Z -factor) من الشكل رقم (1.2)، أو يتم حسابها، ولقد قمنا بوضع برنامج لحساب عامل الانضغاط (Z -factor) بواسطة الحاسوب باستعمال معادلات

(Hall-Yarborough) والتي طورت باستعمال معادلة الحالة لـ (Carnahan) وهي:

$$Z = \frac{0.06125 \times P_{Pr} \times t_{in} \times e^{-1.2(1-t_{in})^2}}{\rho_r} \quad (1.25)$$

$$t_{in} = \frac{1}{T_{Pr}} = \frac{T_{Pc}}{T} \quad (1.26)$$

يتم الحصول على قيمة الكثافة المصغرة (ρ_r) بحل المعادلة التالية:

$$\left[\begin{aligned} & -0.06125 \times P_{Pr} \times t_{in} \times e^{-1.2(1-t_{in})^2} + \frac{\rho_r + \rho_r^2 + \rho_r^3 - \rho_r^4}{(1-y)^3} - \\ & (14.76 \times t_{in} - 9.76 \times t_{in}^2 + 4.58 \times t_{in}^3) \rho_r^2 + \\ & (90.7 \times t_{in} - 242.2 \times t_{in}^2 + 42.4 \times t_{in}^3) \rho_r^{(2.18+2.82 \times t_{in})} = 0 \end{aligned} \right] \quad (1.27)$$

إن المعادلة (1.27) غير خطية ويمكن حلها بطريقة مناسبة بالنسبة لـ (ρ_r) باستعمال تقنية

التكرارية البسيطة لـ (Newton and Raphson) وهي التالية:

١- يتم تحديد قيمة أولية لـ (ρ_r^k) ولتكن $(\rho_r^1 = 0.001)$ حيث أن (k) هو عدد مرات التكرار في الحساب.

٢- تعوّض هذه القيمة في المعادلة (1.27) ويتم ضبط قيمة (ρ_r) المفترضة، وتحدد أفضل قيمة لـ (ρ_r) كما يلي:

$$\rho_r^{k+1} = \rho_r^k - f^k / (df^k / d\rho_r) \quad (1.28)$$

حيث أن الحد $(df / d\rho_r)$ يمكن الحصول عليه باشتقاق المعادلة (1.27) كما يلي:

$$\frac{df}{d\rho_r} = \left[\frac{1 + 4\rho_r + 4\rho_r^2 - 4\rho_r^3 + \rho_r^4}{(1-y)^4} - (29.52t_{in} - 19.52t_{in}^2 + 9.16t_{in}^3)\rho_r + \right. \\ \left. (2.18 + 2.82t_{in})(90.7t_{in} - 242.2t_{in}^2 + 42.4t_{in}^3)\rho_r^{(1.18+2.82t_{in})} \right] \quad (1.29)$$

٣- يكرر استعمال المعادلة (1.27) و المعادلة (1.28) حتى الوصول إلى القيمة $(f^k \approx 0)$.

٤- تعوّض القيمة الصحيحة لـ (ρ_r) في المعادلة (1.27) فنحصل على قيمة (Z) .

١-٢-٤ - انضغاطية الغاز: (Gas Compressibility)

تعرف انضغاطية الغاز عند ثبات درجة الحرارة بأنها مقدار تغير حجم معين من الغاز لدى تغير الضغط عند درجة حرارة ثابتة، ويمكن أن نكتب:

$$C_g = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right) \quad (1.30)$$

ويجب التفريق بين هذا التعريف وبين عامل انضغاط الغاز (Z) .

تعطى انضغاطية الغاز المثالي بالعلاقة التالية: (1.31)

$$C_g = 1/P$$

تعطى انضغاطية الغاز الحقيقي بالعلاقة التالية: (1.32)

$$C_g = \frac{1}{P} - \frac{1}{Z} \frac{\partial Z}{\partial P}$$

إن تحديد انضغاطية الغاز الحقيقي يتطلب تحديد تغيرات العامل (Z) بتغير الضغط ودرجة الحرارة وبما أن أغلب الجداول والمعادلات عبرت عن عامل الانضغاط كتابع للضغط ودرجة الحرارة المصغرين فإن الانضغاطية المصغرة (C_r) يمكن التعبير عنها كتابع لـ (P_{Pr}) عند قيمة ثابتة لـ (T_{Pr}) كما يلي:

$$C_r = \frac{1}{P_{Pr}} - \frac{1}{Z} \left(\frac{\partial Z}{\partial P_{Pr}} \right)_{T_{Pr}} \quad (1.33)$$

يتم الحصول على قيم $\left(\frac{\partial Z}{\partial P_{Pr}}\right)_{T_{Pr}}$ من الشكل (1.2) عند القيمة المعينة لعامل الانضغاط (Z) ، وبعدها نحصل على قيمة (C_r, T_{Pr}) كتابع لـ (T_{Pr}, P_{Pr}) من أحد الشكلين (1.3) ثم نحسب قيمة (C_r) من العلاقة التالية:

$$C_r = \frac{C_r \cdot T_{Pr}}{T_{Pr}} \quad (1.34)$$

وبعد ذلك نحسب قيمة انضغاطية الغاز من العلاقة التالية:

$$C_g = \frac{C_r}{P_{Pc}} \quad (1.35)$$

ويمكن أيضاً أن يتم حساب تغير $(Z - factor)$ مع الضغط (P) باستخدام التعبير التحليلي $(Analytical Expression)$ وهو حساب $(Z - factor)$ عند الضغوط القريبة من قيمة أعلى وأخرى أخفض من قيمة الضغط المطلوب كما يلي:

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial P_{Pr}}\right)_{T_{Pr}} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{P_{Pr1} - P_{Pr2}}\right)_{T_{Pr}} \quad (1.36)$$

$$C_r = \frac{1}{P_{Pr}} - \frac{1}{Z} \left(\frac{Z_1 - Z_2}{P_{Pr1} - P_{Pr2}}\right) \quad (1.37) \quad \text{وتصبح:}$$

حيث أن: P_{Pr2}, P_{Pr1} = الضغط شبه المصغر عند قيم الضغط (P_2, P_1) على الترتيب .

توجد طريقة أخرى لحساب انضغاطية الغاز باستخدام المعادلة التالية:

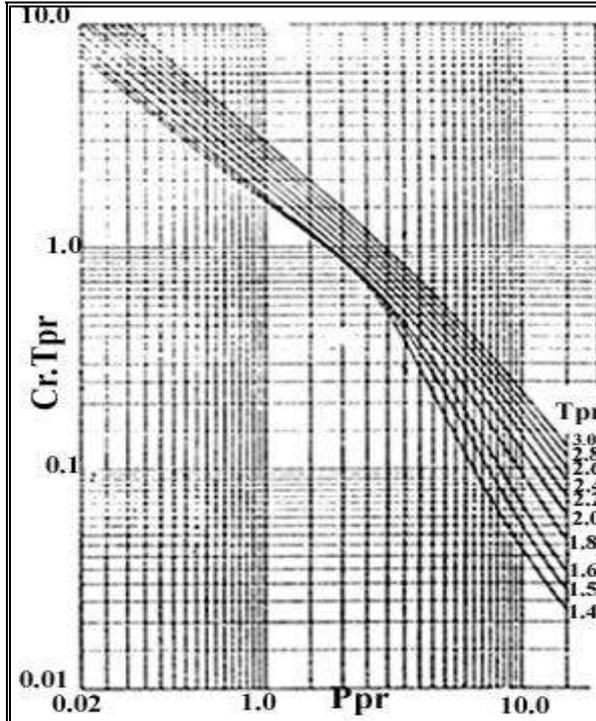
$$\frac{1}{C_g} = P_{Pc} \cdot P_{Pr} \left(1 + \frac{\rho_r}{Z} \frac{\partial Z}{\partial y}\right) \quad (1.38)$$

حيث أن: (ρ_r) هي الكثافة المصغرة والتي تم حسابها بالمعادلة رقم (1.28) .

$$\frac{\partial Z}{\partial \rho_r} = \frac{1}{\rho_r \cdot T_{Pr}} \left[5a_1 \cdot \rho_r^5 + 2a_2 \cdot \rho_r^2 + a_3 \cdot \rho_r + 2a_4 \cdot \rho_r^2 (1 + a_5 \cdot \rho_r^2 - a_5^2 \cdot \rho_r^4) \exp(-a_5 \cdot \rho_r^2)\right] \quad (1.39)$$

$$a_1 = 0.06423, a_4 = 0.6816/T_{Pr}^2, a_5 = 0.6845,$$

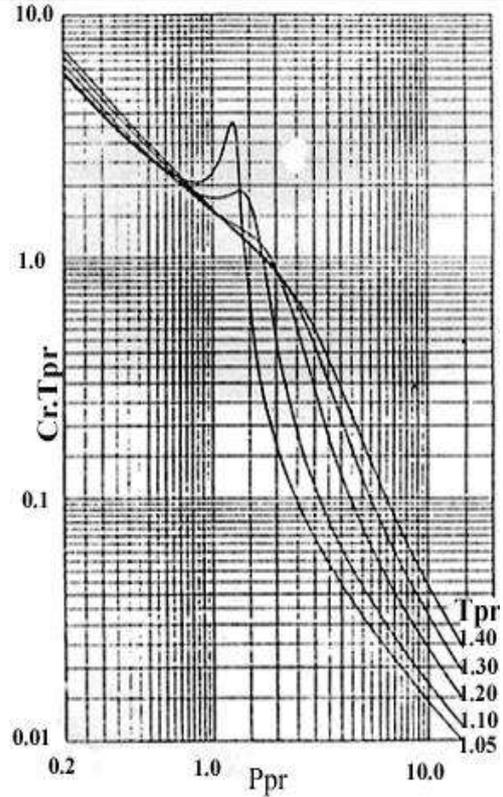
$$a_2 = 0.5353 \cdot T_{Pr} - 0.6123, a_3 = 0.3151 \cdot T_{Pr} - 0.5783/T_{Pr}^2 - 1.0467$$



الشكل (1.3) تغيرات $(C_R.T_{Pr})$ مع

(T_{Pr}, P_{Pr})

عند $(1.4 < T_{Pr} < 3), (0.2 < P_{Pr} < 15)$



الشكل (1.3) تغيرات $(C_R.T_{Pr})$ مع

عند (T_{Pr}, P_{Pr})

$(1.05 < T_{Pr} < 1.4), (0.2 < P_{Pr} < 15)$

١-٢-٥ - عامل حجم الغاز: (Gas Formation Volume Factor)

تكون معدلات الجريان والكميات المنتجة في أغلب عمليات إنتاج الغاز مقاسة بالشروط القياسية كالمقدم المكعب القياسي في اليوم (*scfd*)، ويطلب في هندسة المكامن وحسابات الجريان في الأنابيب معرفة الحجم في الشروط الطبقيّة من ضغط ودرجة الحرارة، لهذا نحتاج إلى عامل تحويل مناسب من الشروط القياسية إلى الشروط الطبقيّة، هذا العامل يسمى **عامل حجم الغاز** ويعرّف بأنه نسبة **الحجم الحقيقي** الذي يشغله الغاز عند ضغط ودرجة حرارة معينة (الشروط الطبقيّة) إلى الحجم الذي يشغله الغاز ذاته في الشروط القياسية، ويتم الحصول عليه باستخدام القانون العام للغازات كما يلي:

$$PV = ZnRT \quad (1.40) \quad \text{في الشروط الطبقيّة:}$$

$$P_{sc} \cdot V_{sc} = Z_{sc} nRT_{sc} \quad (1.41) \quad \text{في الشروط القياسية:}$$

من المعادلتين (1.40) و (1.41) نحصل على عامل حجم الغاز كما يلي:

$$B_g = \frac{V}{V_{sc}} = \frac{T \cdot P_{sc} \cdot Z}{T_{sc} \cdot P \cdot Z_{sc}} \quad (1.42)$$

وعند استعمال الشروط القياسية التالية ($Z_{sc}=1$ ، $P_{sc}=14.7psia$ ، $T_{sc}=520^\circ R$) نحصل

$$B_g = 0.0283 \frac{Z \cdot T}{P} (ft^3 / scf) \quad (1.43) \quad \text{على:}$$

$$B_g = 0.00504 \frac{Z \cdot T}{P} (bbl/scf)$$

$$B_g = 0.3495 \frac{Z \cdot T}{P} (m^3 / scm^3) \quad \text{وفي الجملة الدولية نجد:}$$

١-٢-٦- لزوجة الغاز: (*Gas Viscosity*)

لزوجة المائع هي قياس لقابلية المائع على الجريان، وتتعلق بتركيب المائع والضغط ودرجة الحرارة وبما انه من الصعب قياس لزوجة الغاز، لذلك تم إيجاد طرق لحسابها، وأولى هذه الطرق هي طريقة (Lee) الذي وضع تعبيراً تحليلياً للزوجة الغاز الهيدروكربوني، يتمثل بالمعادلة التالية:

$$\mu_g = k \cdot 10^{-4} \exp(x \rho_g^w)$$

$$\left[\begin{array}{l} k = \frac{(9.4 + 0.02M_a)T^{1.5}}{209 + 19M_a + T} \\ x = 3.5 + (986/T) + 0.01M_a \\ w = 2.4 - 0.02x \end{array} \right] \quad (1.44) \quad \text{حيث أن:}$$

$$\rho_g = \text{كثافة الغاز } g/cc$$

الطريقة الثانية لحساب لزوجة الغاز هي طريقة كار (Carr) كما يلي:

١- يتم حساب الوزن الجزيئي الظاهري لخليط الغاز (الغاز الحقيقي) كما تم شرحه في الفقرة (1-2-1) أو من العلاقة (1.10) إذا كان الوزن الجزيئي للغاز الحقيقي معلوماً.

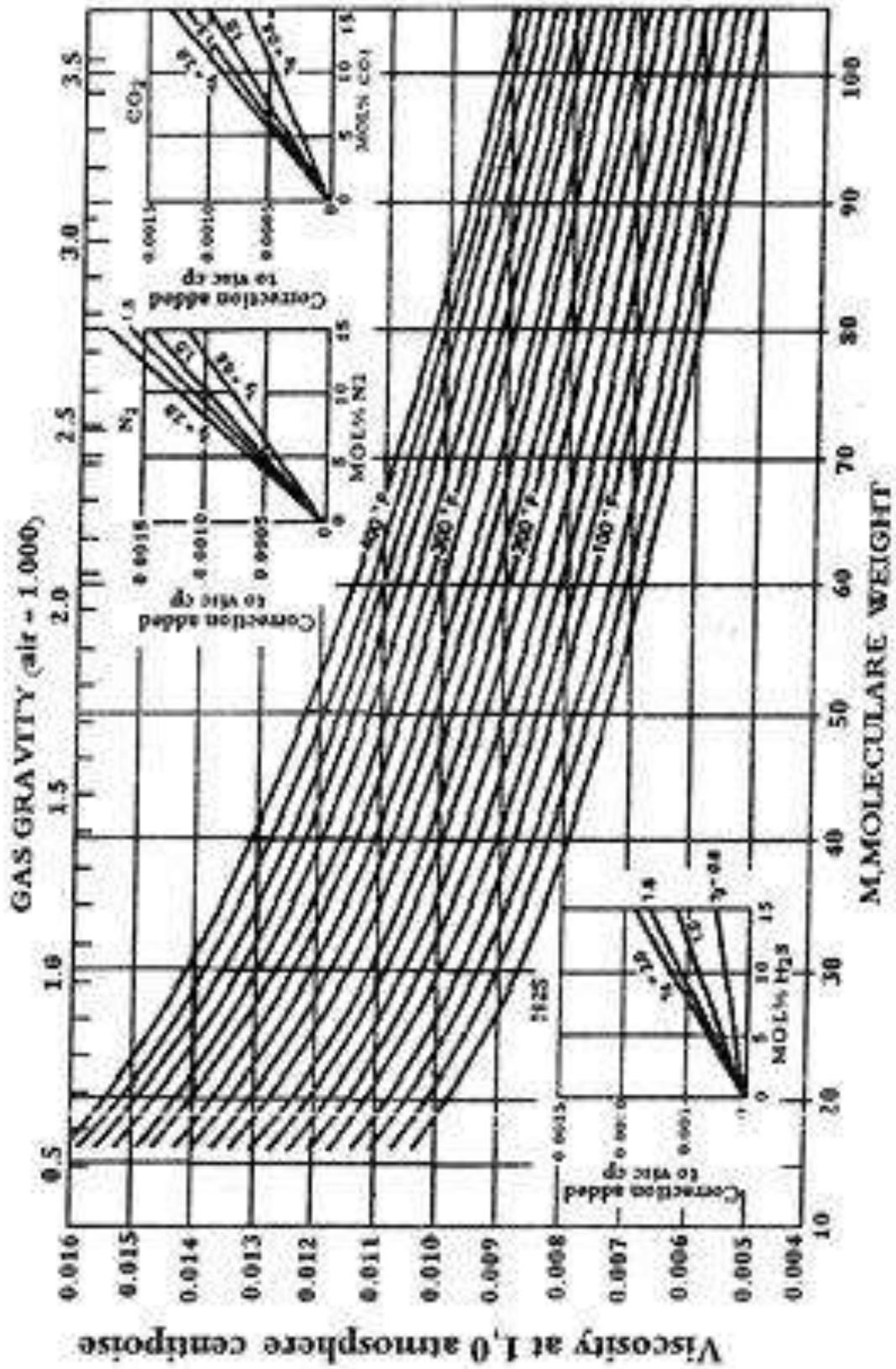
٢- يتم تحديد لزوجة الغاز (μ_1) عند الضغط الجوي (1 atm) ودرجة حرارة المكنن من المنحني رقم (1.4).

٣- يتم حساب (P_{pr}) و (T_{pr}) كما ورد في الفقرة (1-3-1)

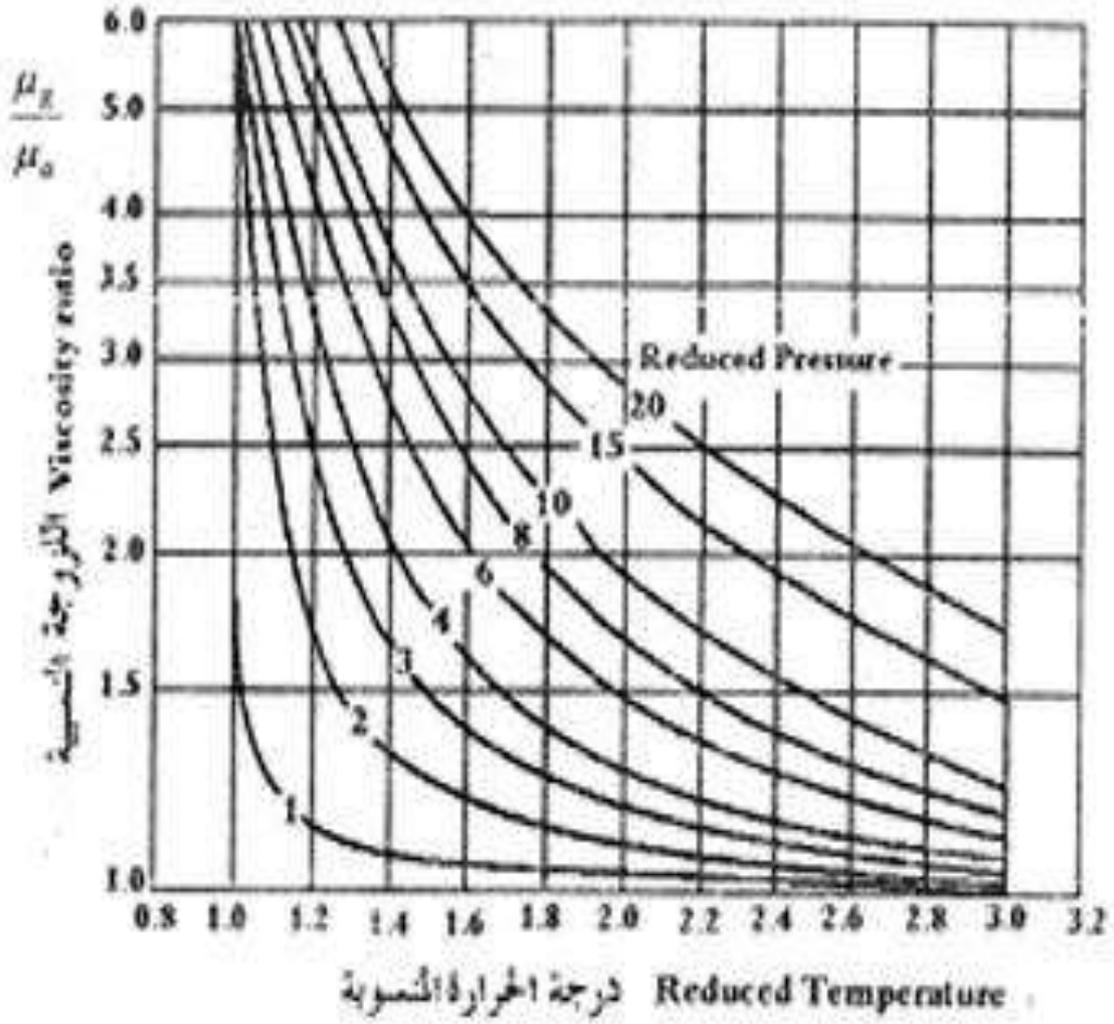
٤- يتم تحديد ($\frac{\mu_g}{\mu_1}$) من المنحنيات الموضحة بالشكل رقم (1.5).

٥- يتم حساب لزوجة الغاز من العلاقة التالية :

$$\mu_g = \mu_1 \left(\frac{\mu_g}{\mu_1} \right) \quad (1.45)$$



الشكل (1.4) تحديد لزوجة الغاز عند الضغط الجوي



الشكل (1.5) تحديد نسبة اللزوجة $\left(\frac{\mu_g}{\mu_1}\right)$

٣-١- هيدرات (مائيات) الغاز

هيدرات الغاز: هي فئة من المركبات الصلبة غير المتجانسة. تتشكل عند وجود مادة هيدروكربونية مضيئة و الماء الحر من خلال الرابطة الهيدروجينية عند ضغط معين ودرجات حرارة اعلى بكثير من نقطة تجمد الماء، حيث تتشكل عندما تكون درجة حرارة الغاز اقل من درجة حرارة معلومة تدعى درجة حرارة التميؤ. كما اظهرت الدراسات ان جزيئة هيدروكربونية واحدة تتحد مع (6-7) جزيئات من الماء مشكلة بلورات بيضاء اللون تشبه قطع الثلج او الجليد في مظهرها الخارجي، ان تكثف بخار الماء من الغاز الطبيعي تحت ضغط معين يحصل عندما تكون درجة الحرارة اقل او مساوية لنقطة الندى (dew point) وهذا الماء الحر الذي يتم الحصول عليه يشكل الاساس لتشكل الهيدرات.

إذا ان درجة حرارة التميؤ ستكون اقل او مساوية لدرجة حرارة نقطة الندى ، ولكنها لن تكون اعلى منها مطلقا. ويجب التفريق بين هيدرات الغاز وهيدرات الملح.

عند القيام بحل المسائل التي تتعلق بإنتاجية الغاز يصبح من الضروري تحديد وبالتالي تجنب الظروف التي تعزز تكوين الهيدرات والتي قد توقف الجريان في الانابيب السطحية واجهزة اختبار البئر.

ان تشكل الهيدرات في خطوط الجريان قد يؤدي إلى تقليل قيم الضغوط المقاسة عند رأس البئر كما يؤدي إلى خفض معدلات الجريان في جهاز قياس معدل الجريان ويؤدي التكوين الفائض من الهيدرات أيضا إلى الانسداد الكلي لخطوط الجريان والاجهزة السطحية.

ان الظروف التي تساعد على تشكل هيدرات الغاز هي:

١- وجود الغاز عند درجة حرارة تساوي أو اقل من نقطة الندى للماء الذي يحتويه مع وجود الماء الحر.

٢- وجود ضغط عال.

٣- السرعات العالية.

٤- تذبذب الضغط أي وجود الاضطراب.

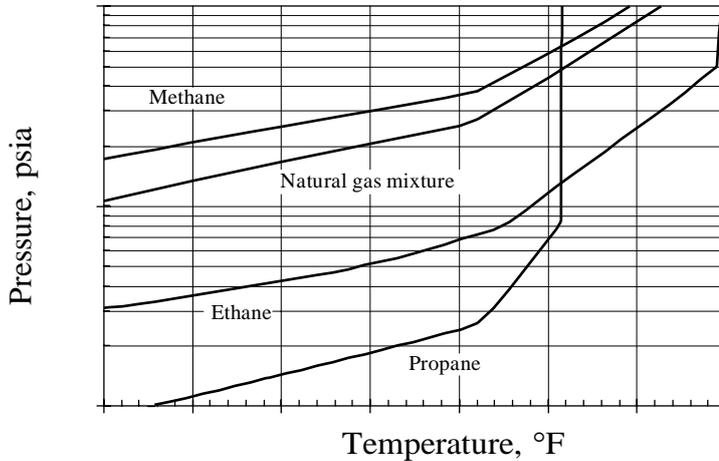
٥- تشكل هيدرات كريستالية صغيرة والتي تشكل نواة لتشكيل الهيدرات.

٦- وجود منعطفات على خطوط نقل النفط واجهزة ومنظمات الضغط وغيرها .

٧- احتواء الغاز على (CO_2) و (H_2S)

توجد منحنيات لتحديد درجة حرارة تشكل الهيدرات وذلك اعتمادا على ضغط الممكن انظر

الشكل (1.6) .



الشكل (1.6) يمثل ظروف تشكل الهيدرات للميثان والايثان والبروبان النقية ولخليط الغاز الطبيعي .

كما توجد منحنيات لتحديد درجة حرارة تشكل الهيدرات وذلك اعتمادا على ضغط المكمّن والوزن النوعي للغاز الطبيعي انظر الشكل (1.7) والتي يمكن كتابتها على شكل معادلة رياضية كما يلي:

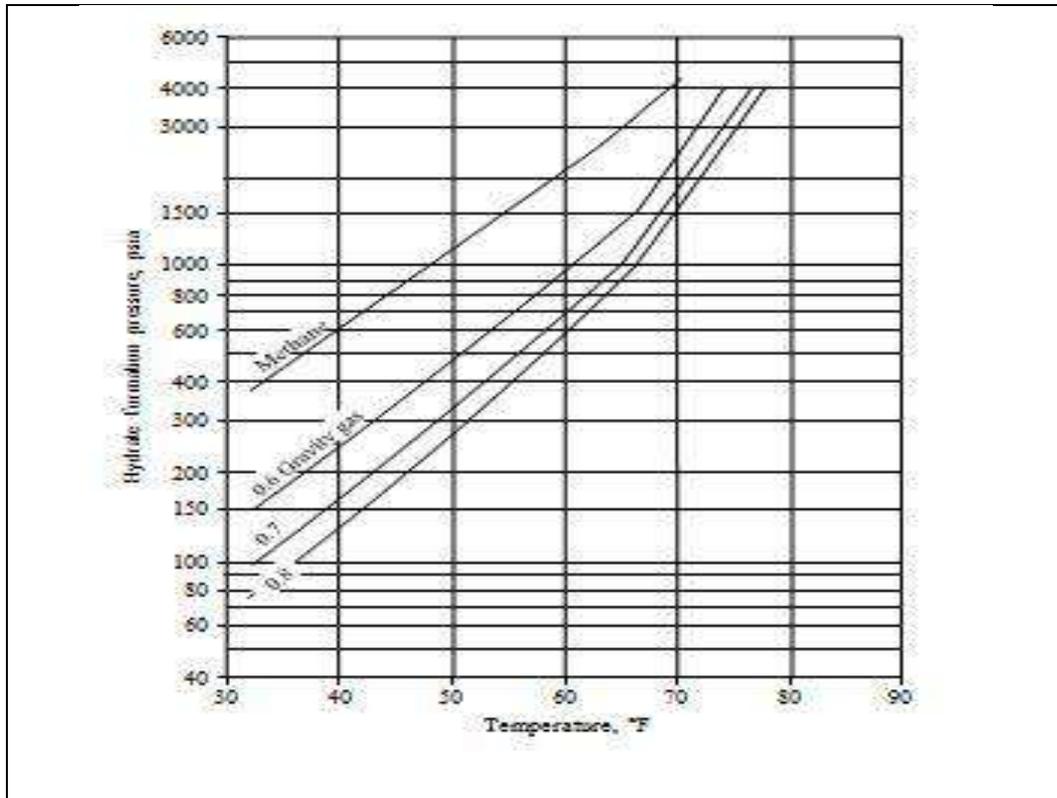
$$t(^{\circ}\text{F}) = -16.5 - 6.83 (\gamma_G)^2 + 13.8 \ln[P(\text{Psia})] \quad (1.46)$$

$$t(^{\circ}\text{C}) = -6.44 - 3.79 (\gamma_G)^2 + 7.68 \ln[P(\text{Par})] \quad (1.47)$$

عند احتواء الغاز الطبيعي على (CO_2) و (H_2S) و (N_2) يجب إجراء التصحيح المناسب. حيث ان احتواء الغاز الطبيعي على كل من (CO_2) و (H_2S) يرفع درجة حرارة التشكل بشكل كبير مما يزيد من امكانية تشكل الهيدرات ، اما غاز الازوت فان وجوده يخفض درجة حرارة التشكل.

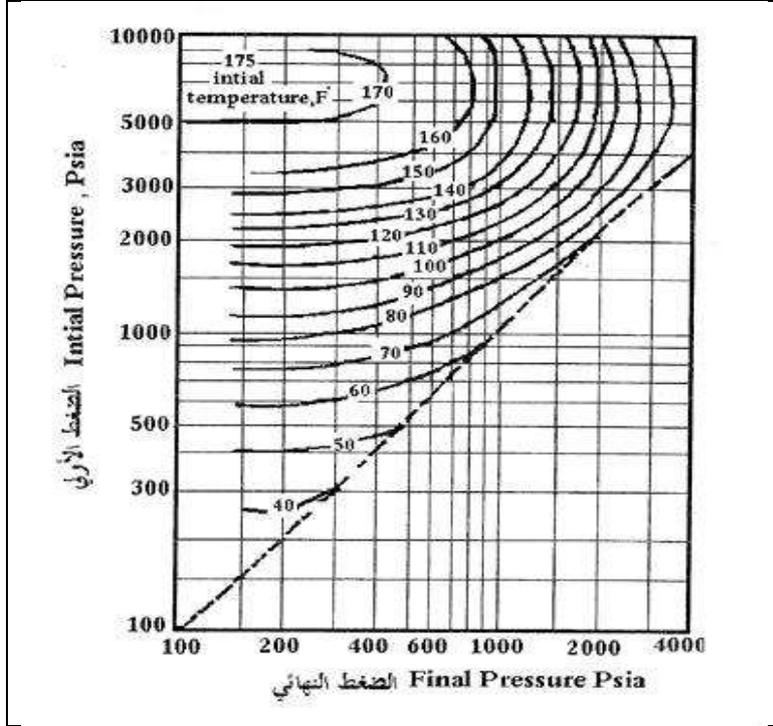
تستخدم طرق مختلفة لمنع تشكل الهيدرات في انظمة الغاز الطبيعي هي:

- ١- المحافظة على درجة حرارة النظام الغازي اعلى من درجة حرارة تشكل الهيدرات عند ضغط معين.
- ٢- المحافظة على ضغط معين للنظام الغازي اقل من ضغط تشكل الهيدرات عند درجة حرارة معينة.
- ٣- ابعاد بخار الماء من الغاز الطبيعي.
- ٤- اضافة موانع تشكل الهيدرات كالميتانول والايثانول إلى تيار الغاز الطبيعي.

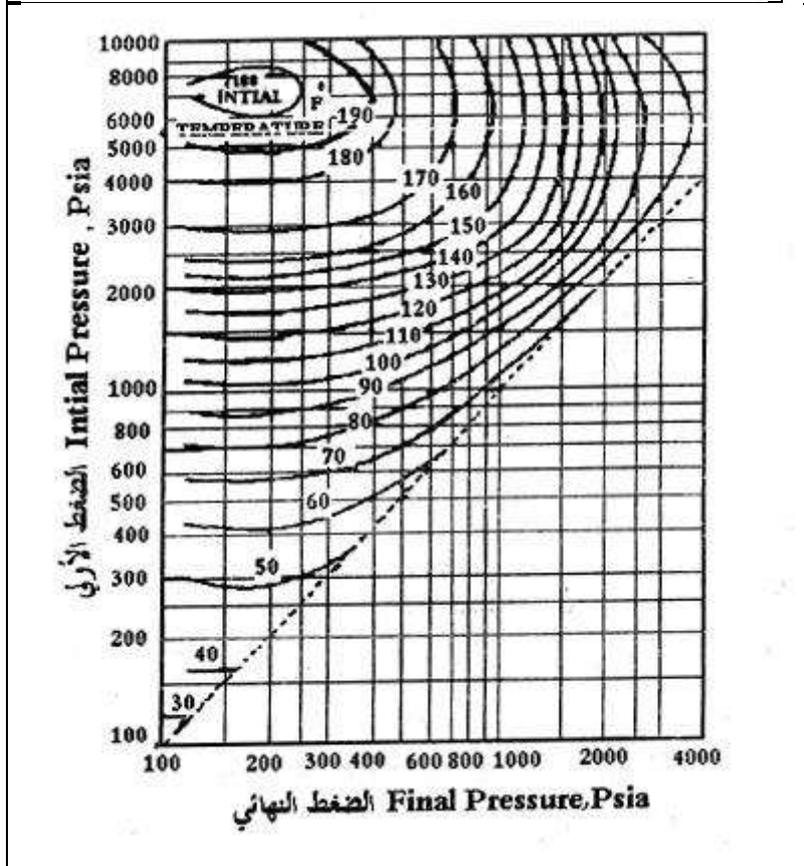


الشكل (1.7) يوضح منحنيات التنبؤ بتشكل هيدرات الغازات الطبيعية كتابع للوزن النوعي للغاز عند ضغط اقل من (1000 Psia)

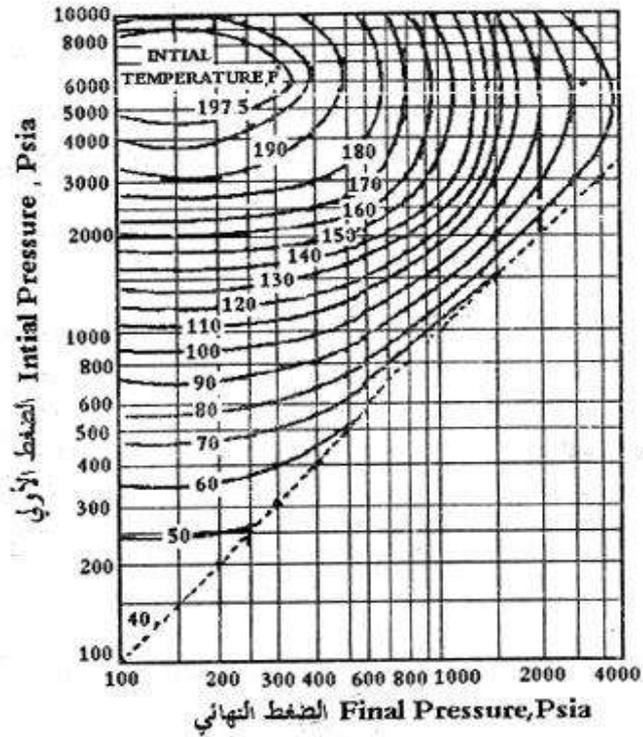
عند التمدد المفاجئ للغاز الطبيعي الذي يرافقه انخفاض في درجة الحرارة ،يمكن استخدام المنحنيات المبينة بالاشكال (1.8) حتى (1.12) عند وزن نوعي معين للغاز الطبيعي لتحديد ظروف تشكل الهيدرات عند تغير درجة الحرارة وتغير الضغط من الضغط الأولي وحتى الضغط النهائي.



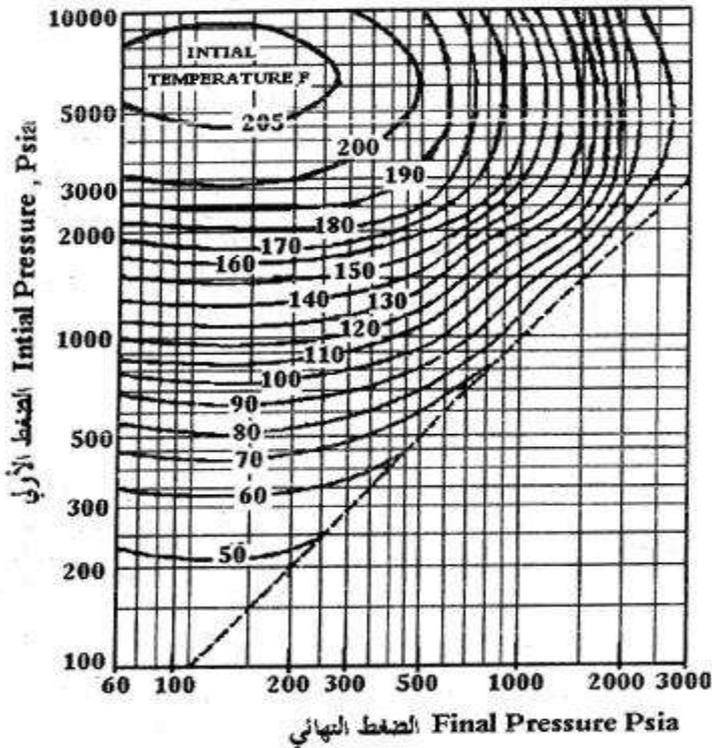
الشكل (1.8) تحديد شروط تشكل الهيدرات عند الوزن النوعي (0.6) للغاز الطبيعي



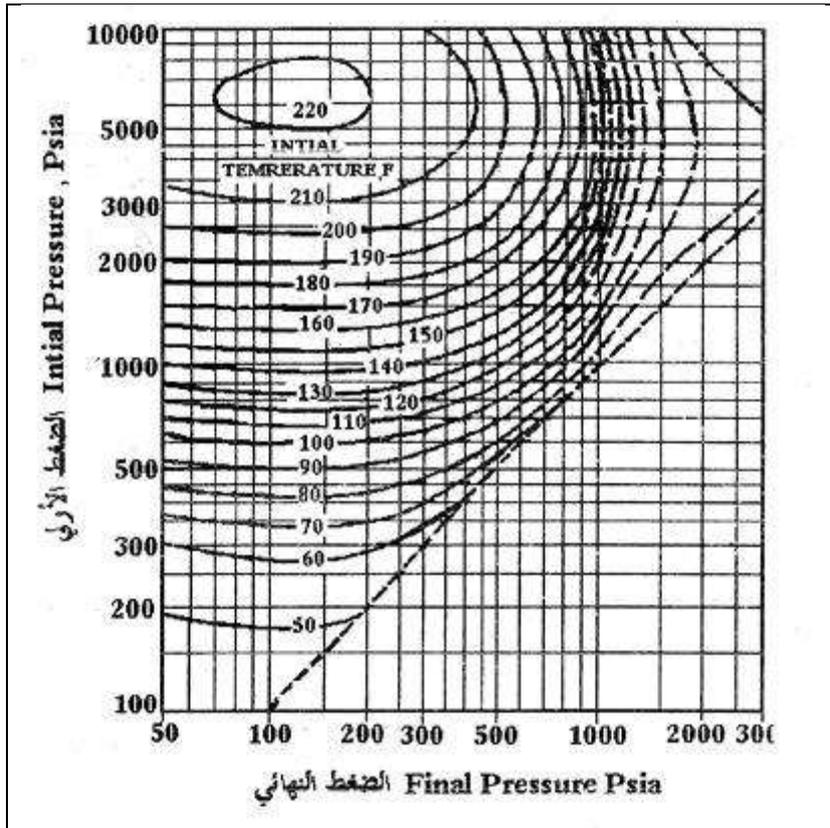
الشكل (1.9) تحديد شروط تشكل الهيدرات عند الوزن النوعي (0.7) للغاز الطبيعي



الشكل (1.10) تحديد شروط
تشكل الهيدرات عند الوزن
النوعي (0.8) للغاز الطبيعي



الشكل (1.11) تحديد
شروط تشكل الهيدرات
عند الوزن النوعي (0.9)
لـلغاز الطبيعي



الشكل (1.12) تحديد شروط
تشكل الهيدرات عند الوزن
النوعي (1.0) للغاز
الطبيعي

الفصل الثاني

طرق استثمار المكامن الغازية

(*Exploitation Ways of Gas Reservoirs*)

مقدمة:

استعمل الغاز الطبيعي (*Natural Gas*) كوقود منذ أكثر من (150) عاماً بشكل مبدئي في مناطق إنتاجه فقط والإنتاج الفائض منه كان يتم تصريفه إلى الهواء أو إشعاله، غير أن ازدياد الطلب عليه قد تطوّر بشكل ملحوظ حديثاً مما أدى إلى ارتفاع كبير في أسعاره، الأمر الذي شجع على تطوير تقنيات إنتاجه ونقله .

يختلف إنتاج الغاز الطبيعي عن النفط ليس فقط بسبب اختلاف الخصائص الفيزيائية لكل منهما وإنما أيضاً لأسباب اقتصادية، حيث أن الإنتاج من حقل نفطي يمكن أن يخضع لتطوير مثالي ولنمط تطوير يعتمد على ميزاته الخاصة به، بينما مكنم الغاز يرتبط بشكل مباشر بالاستهلاك أو التسويق وبالتالي فإن الخصائص الفيزيائية للمكنم لا يمكن أن تحدد بمفردها نمط تطويره، فلحقل غازي معين هناك علاقة مباشرة بين الكمية المنتجة من الغاز ومراحل التسويق أو الاستهلاك.

وبالنتيجة فإن نمط التطوير المثالي لحقل الغاز الطبيعي يرتبط دائماً بالصفات النموذجية لهذا الحقل من جهة، وبكمية الاستهلاك أو الكمية المتعاقد عليها والمطلوب إنتاجها من هذا الحقل من جهة أخرى.

إن تطوير الدراسات في مجال تحليل استثمار المكامن الغازية يمكن أن يكون حسب

الاتجاهات التالية:

١ - تحديد احتياطي الغاز .

٢- تأثير العوامل الجيولوجية الحقلية والتكنولوجية على سرعة تغلغل المياه في المكنم

وعلى عامل المردود النهائي للغاز .

٣- معدل الإنتاج .

٤- شروط استغلال الآبار الغازية .

ومن خلال الدراسات العالمية فقد وجد أن العوامل الجيولوجية الأساسية التي تؤثر على استثمار المكامن الغازية هي: الضغط الطبقي الأولي والخواص الخزنانية للطبقة وخصائص الغاز نفسه.

أما العوامل التكنولوجية فهي:

١- توزيع الآبار على مساحة الحقل.

٢- درجة اختراق الآبار للطبقة المنتجة.

٣- سرعة استخراج الغاز والتي تؤثر على كامل مراحل الاستثمار.

ومن هنا يجب على المهندس المعني بهذا الأمر أن تكون له القدرة على تحديد الغاز القابل للاستثمار في المكنم والزمن اللازم لإنتاجه وهذا يتطلب:

١- تحاليل خاصة لأداء الآبار.

٢- كيف يتغير أداء البئر عندما يستثمر الغاز من المكنم ويهبط الضغط .

٣- تحديد العلاقة بين معدل جريان الغاز وانخفاض الضغط في كافة أجزاء المنظومة (المكنم وكافة التجهيزات على حد سواء)، الأمر الذي يتطلب معرفة الكثير عن الصفات الفيزيائية الكيميائية للغاز الطبيعي عند ضغوط ودرجات حرارة مختلفة.

وبالنتيجة فإن التشغيل الجيد لحقل غازي يتطلب مراقبة مستمرة لأداء الحقل ككل ولكل بئر على حداً من أجل تحديد المشاكل التي يمكن أن تؤدي إلى انخفاض إنتاجية الغاز، وإن المتغيرات التي يجب مراقبتها هي: الضغط - معدل الجريان - الإنتاج التراكمي - إنتاج المكنمات الغازية.

٢-١ - أنظمة عمل المكامن الغازية: (Work Systems of Gas Reservoirs)

يفهم من نظام عمل المكنم بأنه القوة المحركة داخل الطبقة التي تؤدي إلى جريان الغاز باتجاه الآبار، وتقسم أنظمة عمل مكامن الغاز وفقاً للمصادر الرئيسية للطاقة الطباقية بالنسبة للمكامن الحاملة للغاز إلى ثلاث مجموعات هي:

❖ نظام العمل ذو الدفع المائي.

❖ نظام العمل ذو الدفع الغازي - المائي المرن.

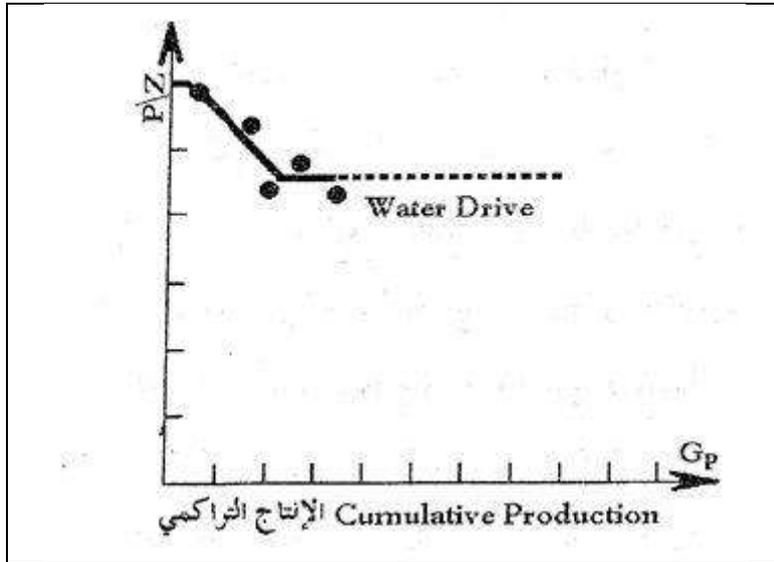
❖ نظام العمل ذو الدفع الغازي .

٢-٢-١ - نظام العمل ذو الدفع الغازي:

في هذا النظام ، يجري الغاز إلى قيعان الآبار تحت تأثير الطاقة المرنة للغاز المضغوط ، يتحقق هذا النظام في المكامن الحجمية المغلقة ، حيث لا توجد مياه مكمنية ، لهذا لا يتغير الحجم المسامي المشبع بالغاز الا عند تشكل المكثفات الغازية في الطبقة.

٢-٢-٢ - نظام العمل ذو الدفع المائي:

في هذا النظام يقل حجم الطبقة المشبعة بالغاز أثناء استثمار المكن ، بسبب دخول المياه إلى المنطقة الغازية ، وبالتالي يتم جريان الغاز إلى قيعان الآبار الانتاجي بفعل دفع المياه ومرونة الغاز، وهذا يؤدي إلى ابطاء معدل انخفاض الضغط في المكن. يبين الشكل (2.1) ان الاستثمار في بدايته يعتمد على مرونة الغاز وفي نهايته على دفع الماء.



الشكل (2.1) العلاقة بين الإنتاج التراكمي و (P/Z) عند نظام دفع الماء

٢-٢ - تنظيم استثمار المكامن الغازية: (Organizing Exploitation of Gas Reservoir)

يقصد بتنظيم استثمار حقل النفط أو الغاز، التحكم بحركة الموائع في الطبقة إلى آبار الإنتاج بواسطة نظام معين لتحديد توزيع عدد معين من الآبار على المساحة المفروضة، ونظام وضع هذه الآبار في الإنتاج والمحافظة على نظام عملها وضبط توازن الطاقة الطبقة .

يسمح استخدام الطرق المستنتجة للتنبؤ بعمليات استثمار المكامن الغازية بتحديد علاقات التغيرات مع الزمن لمؤشرات الاستثمار لحالة معينة محددة وذلك بوضع عدد من المؤشرات التكنولوجية لاستثمار الحقل الغازي مثل معدل استخراج الغاز من المكن بالعلاقة

مع الزمن، زمن استخراج الغاز والنظام التكنولوجي لاستغلال الآبار، هذه المؤشرات يجب أن تكون أقرب ما يمكن إلى المثالية، لهذا فان نظرية وضع المكامن الغازية بالاستثمار يجب أن تطوّر باتجاه البحث عن النماذج المثالية للحل .

تهدف طرق تنظيم الاستثمار إلى تحسين المؤشرات التكنولوجية والاقتصادية لإنتاج الغاز وزيادة عامل مردود الطبقة من الغاز، أما جعل هذا الاستثمار مثالياً فيتم من خلال وضع الطريقة الأفضل لاستثمار المكنم الغازي. وتعتبر الخاصية الرئيسية لاستثمار حقول الغاز الطبيعي، الارتباط الوثيق بين كل عناصر نظام الاستثمار: الطبقة - البئر - خطوط الأنابيب .

يتم وضع مخطط استثمار حقل الغاز الطبيعي على أساس الدراسة الجيولوجية للحقل والحسابات الغازية - الديناميكية والمقارنة تقنياً واقتصادياً ما بين الأشكال المختلفة للاستثمار، أما النظام التكنولوجي لاستغلال آبار الغاز فيتم وضعه اعتماداً على المعطيات الناتجة عن عمليات اختبار تلك الآبار، وهذه الأنظمة يجب أن تضمن إمكانية الحصول على أقصى إنتاجيات ممكنة لهذه الآبار مع اقل فقد من الطاقة الطبقيّة، والاستغلال بشكل طبيعي دون إحداث أي خلل قد يؤدي إلى صعوبات ومشاكل. وبما أن ظروف عمل المكنم والبئر تتغير كلما ازداد سحب الغاز، فان الأنظمة التكنولوجية والإنتاجيات العظمى الممكنة للآبار تحدد لفترة تتراوح بين خمسة وستة أشهر وذلك تبعاً لخصائص البئر على أن يتم تدقيق تلك الفترة فيما بعد .

٢-٣ - أدائية المكنم الغازي: (Gas Reservoir Performance)

عند انتقال الغاز من المكنم إلى مكان الاستهلاك يجب أن يمر أولاً من خلال الصخور المكنمية، أي ضمن الوسط المسامي، ويتطلب ذلك صرف كمية معينة من الطاقة للتغلب على مقاومات الجريان التي تظهر على شكل انخفاض في الضغط باتجاه البئر، والذي يعتمد على كل من:

(خصائص الموائع المكنمية، معدل جريان الغاز، خصائص الصخور المكنمية).

٢-٣-١ - خصائص الغازات الطبيعية تم شرحها بالفصل الأول من هذا الكتاب

٢-٣-٢ - الخصائص الفيزيائية للصخور المكمنية: (*Physical Of Reservoir Rocks Properties*). سنورد في هذا الجزء أهم الخصائص المطلوبة لأغلب تطبيقات اختبارات الآبار الغازية:

٢-٣-٢-١ - مسامية الصخور: (*Porosity Of Rocks*)

يطلق اسم المسامية (Φ) على نسبة الفراغات الموجودة ضمن الصخور الطبقيّة إلى الحجم الكلي للصخر، والتي تتوضع ضمنها الموائع الطبقيّة، وتقسم من حيث مبدأ تشكلها إلى قسمين هما:

١- المسامات الأولية: وهي التي تتشكل بين الحبيبات المكونة للصخور أثناء عملية الترسيب وتكوّن الصخور المكمنية .

٢- المسامات الثانوية: وهي التي تتشكل نتيجة العمليات التي تتعرض لها الصخور بعد تشكلها مثل عمليات تفتت الصخور وانحلالها أو تقلصها، والتي تؤدي إلى تشكل الشقوق واحدة قياسها هي النسبة المئوية .

٢-٣-٢-٢ - انضغاطية الصخور: (*Compressibility Of Rocks*)

إن انضغاطية الحجم الكلي للصخر (C_R) تمثل نسبة تغير واحدة حجم الصخر إلى تغير واحدة الضغط، وتحدد مخبرياً عند توفر الاجهزة أو تحدد بالملاحظات التجريبية، والتي لخصها (*Newman*) بالعلاقات التالية:

١- من أجل الحجر الكلسي المتماسك:

$$C_R = \exp(4.026 - 23.07\phi + 44.28\phi^2) \times 10^{-6} \quad (2.1)$$

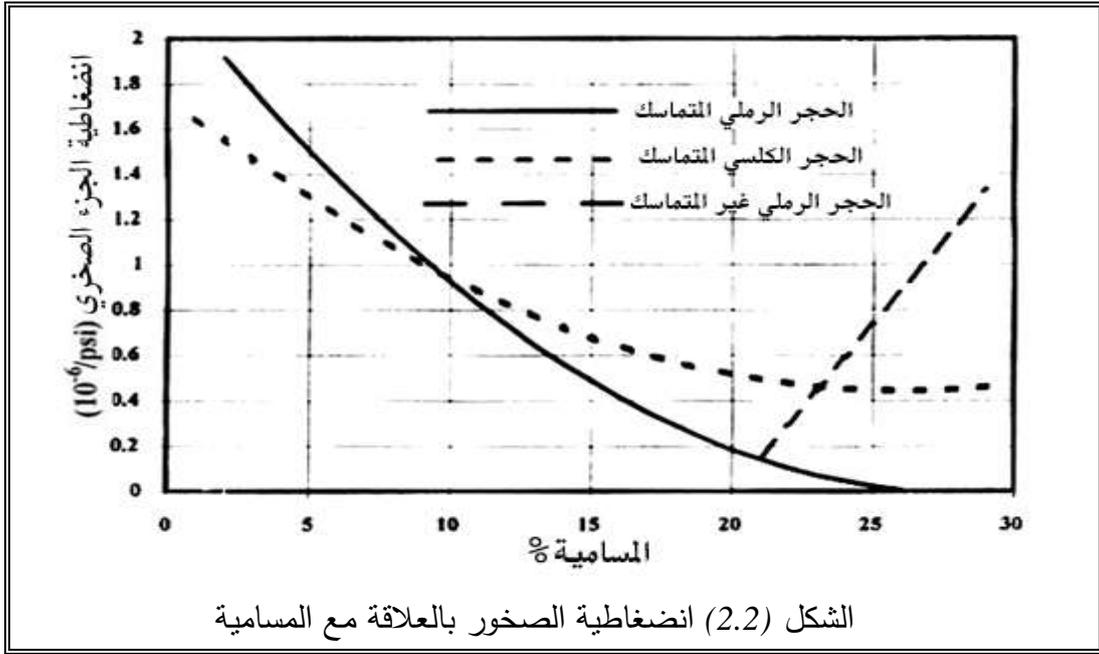
٢- من أجل الحجر الرملي المتماسك:

$$C_R = \exp(5.118 - 36.26\phi + 63.98\phi^2) \times 10^{-6} \quad (2.2)$$

٣- من أجل الحجر الرملي غير المتماسك ولقيم المسامية ($\Phi \geq 0.2$) نكتب:

$$C_R = \exp[34.012(\phi - 0.2)] \times 10^{-6} \quad (2.3)$$

وهذه العلاقات الثلاثة تم تمثيلها بيانياً كما يظهر في الشكل (2.2) .



٢-٣-٢-٣- نفوذية الصخور: (Permeability Of Rocks)

تعرف نفوذية الصخر بأنها خاصية الصخر بالسماح بمرور الموائع من خلالها، وتقسم النفوذية إلى ثلاثة أنواع هي:

- ١- النفوذية المطلقة: هي قدرة الصخر على تمرير طور معين عندما يكون مشبعاً به كلياً.
 - ٢- النفوذية الفعالة لمائع: هي قياس لقابلية الصخر على تمرير طور معين بوجود عدة أطوار، وهذا النوع من النفوذية هو المستخدم في معادلات الجريان لاحقاً .
 - ٣- النفوذية النسبية: وهي نسبة النفوذية الفعالة إلى النفوذية المطلقة وتمثل نسبة جريان طور ما لدى جريان عدة أطوار في آن واحد.
- وتحدد النفوذية من القياسات الجيوفيزيائية أو مخبرياً أو من اختبارات الآبار .

٢-٣-٢-٤- المياه المترابطة: (Connate Water)

عند تجمع الغازات في الطبقات الخازنة، فإنها لم تطرد الماء بشكل كلي من هذه الطبقات وإنما بقيت كمية من المياه فيها لا يمكن إزاحتها، والتي يطلق عليها اسم المياه المترابطة، والتي لا بد من معرفتها لتحديد درجة تشبع هذه الطبقات بالفحوم الهيدروجينية، وتوجد طريقتين لتحديدها هما:

- ١- من نتائج القياسات الكهربائية التي تجرى على الآبار .
- ٢- مخبرياً من منحنى الضغط الشعري بالعلاقة مع درجة التشبع بالماء.

٢-٣-٥- الانضغاطية الكلية: (Total Compressibility)

تعطى الانضغاطية الكلية (C_t) عند وجود عدة أطوار بالعلاقة التالية:

$$C_t = C_R + S_g \cdot C_g + S_o \cdot C_o + S_w \cdot C_w \quad (2.4)$$

وحيث أن المكامن المدروسة لا تحتوي على النفط ، لذلك فإن ($S_o = 0$) والعلاقة (2.4) تصبح:

$$C_t = C_R + S_g \cdot C_g + S_w \cdot C_w \quad (2.5)$$

تم توضيح كيفية حساب كل من (C_g) و (C_R) في مقاطع سابقة من هذا الفصل، أما انضغاطية المياه فتعطى بالعلاقة التالية:

$$C_{wl} = (a + b.T_f + c.T_f^2) \times 10^{-6} \quad (2.6)$$

$$a = 3.8546 - 0.000134 \times P$$

$$b = -0.01052 + 4.77 \times 10^{-7} \times P$$

$$c = 3.9267 \times 10^{-5} - 8.8 \times 10^{-10} \times P$$

حيث أن:

وبإجراء التصحيح بسبب احتواء المياه على ($NaCl$) نحصل على:

$$C_w = C_{wl} \left[1 + NaCl^{0.7} (-0.052 + 0.00027.T_f - 1.14 \times 10^{-6}.T_f^2 + 1.121 \times 10^{-9}.T_f^3) \right] \quad (2.7)$$

٢-٣-٣- جريان الغاز المكمني: (Reservoir Gas Flow)

يتطلب تحديد أدائية التدفق (*Inflow Performance*) أو سعة الجريان لمكمن أو لبئر غازي، إيجاد العلاقة بين معدل الجريان القادم إلى البئر وضغط جريان قاع البئر، ويمكن ذلك بحلٍ مناسب لقانون دارسي والذي يمثل تعبيراً مقبولاً لإيجاد العلاقة بين هبوط الضغط وسرعة جريان الموائع في الوسط المسامي شريطة أن يكون الجريان خطياً (*Linear*)، والذي يعتمد حله على ظروف الجريان المتواجدة في المكمن أو على نظام الجريان (*Flow Regime*).

عندما يفتح البئر بعد أن كان مغلقاً، سيتولد اضطراباً في ضغط البئر، وينتقل هذا الاضطراب في عمق الطبقة عبر الصخور بسرعة معينة تتحكم فيها كل من صفات الصخور وصفات المائع، وسيتم بحث أنواع أنظمة الجريان بالنسبة لاضطراب الضغط هذا، وهي الآتي:

٢-٣-٣-١- جريان الحالة المستقرة: (Steady State Flow)

لا يعتمد نظام الجريان على الزمن. يوضح الشكل (2.3) توزيع الضغط ومعدل الجريان عند الجريان الشعاعي (*Radial Flow*) للحالة المستقرة داخل البئر. حتى تتحقق

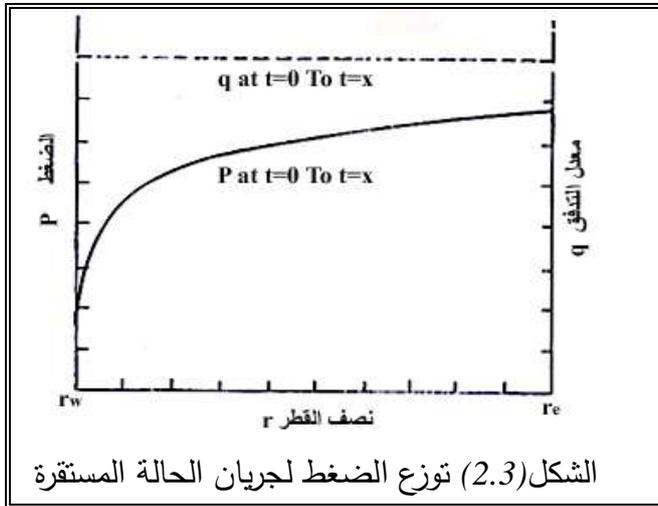
هذه الحالة يجب أن يكون معدل الجريان عبر نصف قطرها لتصريف (r_e) مساوياً لمعدل الجريان عند نصف قطر البئر (r_w) ويتحقق ذلك إذا توفرت الإزاحة المناسبة بالماء (*Water Drive*)، والتي يتساوى فيها معدل التغذية بالماء مع معدل الإنتاج. تفيد معادلات الحالة المستقرة في تحليل الظروف بالقرب من البئر، لأنه حتى في ظروف الحالة غير المستقرة غالباً ما يكون معدل الجريان بالقرب من البئر ثابتاً، لهذا فان معادلات جريان الحالة المستقرة يمكن تطبيقها لهذا الجزء من الممكن دون أي خطأ ملحوظ .

يكتب قانون دارسي للجريان في الوسط المسامي عندما يكون اتجاه جريان المائع بعكس اتجاه محور السينات (محور X) كما يلي:

$$v = -\frac{K}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (2.8)$$

حيث يمثل الحد (dP/dx) تدرج الضغط باتجاه جريان المائع. عند الجريان الشعاعي والذي يعرف فيه البعد بالموجب كلما ابتعدنا عن البئر، تأخذ المعادلة (2.8) الشكل التالي:

$$q = v.A = \frac{K(2\pi.r.h)}{\mu} \frac{dP}{dr} \quad (2.9)$$



وباستخدام المعادلتين التاليتين:

١- معادلة الاستمرارية:

$$\rho_1 \cdot q_1 = \rho_2 \cdot q_2 = Constant \quad (2.10)$$

وبما انه يفضل عادة استخدام معدل جريان الغاز عند الشروط القياسية من الضغط (p_{sc}) ودرجة الحرارة (T_{sc})، وباستخدام هذه الشروط في المعادلة (2.10) نحصل على:

$$\rho \times q = \rho_{sc} \times q_{sc} = const \quad (2.11)$$

$$\rho = \frac{P.M_g}{R.T} \frac{1}{Z}$$

٢- معادلة الحالة للغاز الحقيقي رقم (1.6) وهي:

نعوض المعادلة (1.6) في المعادلة (2.11) فنحصل على:

$$q \frac{P.M_g}{Z.R.T} = q_{sc} \frac{P_{sc}.M_g}{Z_{sc}.R.T_{sc}} \quad (2.12)$$

وبتعويض المعادلة (2.9) في المعادلة (2.12) وحيث أن $(Z_{sc} = 1)$ وبإعادة ترتيب الناتج

$$q_{sc} = \frac{P.T_{sc}}{P_{sc}.Z.T} \frac{2\pi.K_g.h.r}{\mu_g} \frac{dP}{dr} \Leftrightarrow P.dP = \frac{q_{sc}.P_{sc}.T.\mu_g.Z}{T_{sc}.2\pi.K_g.h} \frac{dr}{r} \quad (2.13)$$

إن المتغيران في هذه المعادلة هما (P) و (r) ، بإجراء عملية التكامل نحصل على:

$$\int_{P_w}^{P_e} P.dP = \frac{q_{sc}.P_{sc}.T.\mu_g.Z}{T_{sc}.2\pi.K_g.h} \int_{r_w}^{r_e} \frac{dr}{r} \Leftrightarrow \frac{P_e^2 - P_w^2}{2} = \frac{q_{sc}.P_{sc}.T.\mu_g.Z}{T_{sc}.2\pi.K_g.h} \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) \Leftrightarrow$$

$$q_{sc} = \frac{\pi.K_g.h.T_{sc}(P_e^2 - P_w^2)}{P_{sc}.T.\mu_g.Z.\ln(r_e / r_w)} \quad (2.14)$$

في هذا التكامل تم افتراض أن كل من (μ_g) و (Z) لا يتغيران بتغير الضغط، وتقدر قيمتهما عند درجة حرارة المكمن ومتوسط قيمة الضغط في منطقة التصريف أي عند:

$$\bar{P} = \frac{P_e + P_w}{2}$$

تطبق المعادلة (2.14) لأي مجموعة مألوفة من الواحدات النفطية المعروفة، وفي الواحدات التي نستخدمها في هذه الدراسة والآتي ذكرها تأخذ الشكل التالي:

$$q_{sc} = \frac{703 \times 10^{-6} K_g.h(P_e^2 - P_w^2)}{T.\mu_g.Z.\ln(r_e / r_w)} \quad (2.15)$$

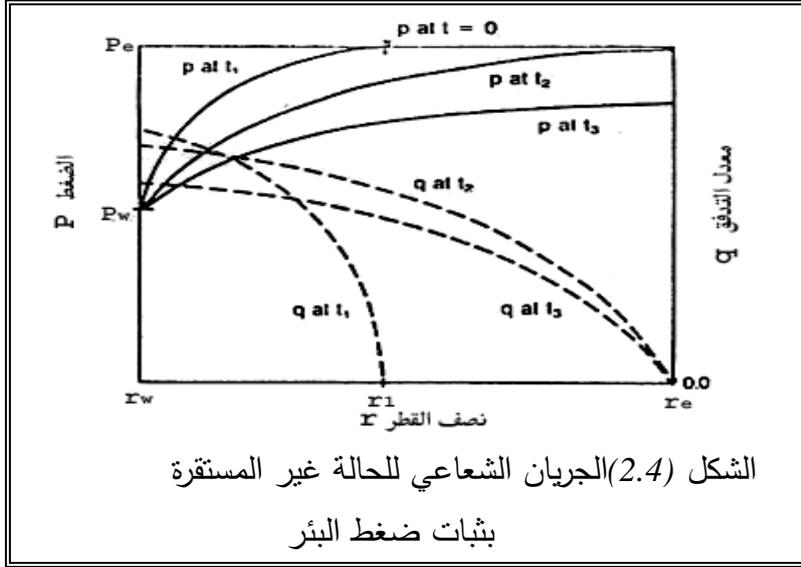
في هذه المعادلة أخذت قيم الضغط ودرجة الحرارة القياسيين والواحدات التالية:

$$P_{sc} = 14.7 \text{ psia}, T_{sc} = 520^\circ R, K_g : md, h : ft, \mu_g : cp$$

٢-٣-٣-٢ - جريان الحالة غير المستقرة: (Unsteady-State-Flow)

عندما تتغير ظروف الجريان مع الزمن في نقطة معينة من المكمن. وبالتالي ستكون الحالة غير مستقرة (Unsteady State). يوضح الشكل (2.4) توزيع الضغط ومعدل الجريان لحالة الجريان الشعاعي غير المستقر للغاز عند أزمنة مختلفة لمكمن مغلق (Closed Reservoir) (أي لا يوجد جريان عند الحدود الخارجية للمكمن r_e)، في هذه الحالة سيكون كل الإنتاج بسبب تمدد المائع في المكمن، وهذا سيؤدي إلى جعل قيمة معدل الجريان عند (r_e) مساوياً للصفر ووصول المعدل إلى الذروة عند جدران البئر (r_w) . في البداية يكون الضغط متساوياً في جميع أنحاء المكمن ويساوي (P_i) وهذا يمثل الزمن صفر للإنتاج، وبعد فترة قصيرة من إنتاج البئر بمعدل ثابت عن طريق ثبات ضغط قاع البئر، يحدث توزيع للضغط، كما هو موضح بالشكل (2.4)، والمشار إليه بالضغط (P) عند الزمن (t_1) ، ويكون جزءاً صغيراً فقط من المكمن قد تأثر بهبوط الضغط بشكل ملحوظ، وبما أن

المائع لا يمكن أن يتمدد ما لم يكن هناك هبوطاً في الضغط، لذلك نلاحظ من رسم معدل الجريان (q) عند الزمن (t_1) أن معدل الجريان يساوي الصفر عند نصف القطر (r_e)، ويزداد مع تناقص نصف القطر إلى أن يصل إلى الذروة عند نصف قطر



البئر (r_w) وكلما ازداد الإنتاج من الممكن كلما ازداد هبوط الضغط إلى أن يتأثر كامل الممكن بهبوط الضغط، كما هو موضح بالضغط عند الزمن (t_2). كما أن معدل الجريان عند جدران البئر ينخفض بمقدار معين لدى تغير الزمن من (t_1) إلى (t_2)، ومع استمرار الإنتاج من البئر بعد ذلك سيأخذ منحنى توزيع الضغط الشكل (P) عند الزمن (t_3) وسيستمر الانخفاض في معدل الجريان خلال الفترة الزمنية من (t_2) إلى (t_3) بسبب الانخفاض في الضغط من (r_e) إلى (r_w) بمقدار ($P_e - P_w$)، أي إن كافة الآبار تعمل في الحالة غير المستقرة حتى يصل اضطراب الضغط إلى حدود الممكن، أو حتى حدوث التداخل (*Interference*) مع الآبار المتأثرة الأخرى. إن معادلة الانتشارية لحالة الجريان غير

$$\frac{\partial^2 p^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p^2}{\partial r} = \frac{\phi \cdot \mu_g \cdot c_t}{k_g} \frac{\partial p^2}{\partial t} \quad (2.16) \quad \text{المستقر هي:}$$

يمكن حل هذه المعادلة بالنسبة للضغط بدلالة معدل الجريان والزمن، ويمكن تبسيط الحلول إذا كتبت المعادلة بدون أبعاد (*Dimensionless*)، وذلك بتعريف المتغيرات اللابعدية

الموضحة بالجدول (2.1). تكتب معادلة الانتشارية بالمتغيرات اللابعدية كما يلي:

$$\frac{\partial \Delta P_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial \Delta P_D}{\partial r_D} = \frac{\partial \Delta P_D}{\partial t_D} \quad (2.17)$$

تعتمد حلول المعادلة (2.17) على نوع الممكن والظروف عند حدوده، وسيتم مناقشة الحالات التالية:

المتغيرات اللابعدية	الرمز	التعريف
الزمن	t_D	$t_D = \frac{2.64 \times 10^{-4} k_g t}{\phi \cdot \mu_g \cdot c_t \cdot r^2}$
نصف القطر	r_D	r / r_w
معدل التدفق	q_D	$q_D = \frac{1422 T q_{sc} \bar{Z} \cdot \mu_g}{k_g \cdot h \cdot p_i^2}$
الضغط	P_D	$p_D = \frac{p^2}{p_i^2 q_D}$
فرق الضغط	ΔP_D	$\Delta p_D = \frac{p_i^2 - p^2}{p_i^2 q_D}$
الجدول (2.1) المتغيرات اللابعدية		

١- الحالة الأولى: معدل جريان ثابت عند البئر والمكمن يتصرف وكأنه غير محدود (الحالة غير المستقرة):

إن أنسب الحلول استخداماً للجريان الانتقالي في هذه الحالة هو:

$$\Delta P_D = 0.5(\ln t_D + 0.809) \quad (2.18)$$

وبعد الحصول على قيمة هبوط الضغط اللابعدي (ΔP_D)، فإنه يمكن

حساب قيم الضغوط الحقيقية باستخدام تعريف (ΔP_D) من الجدول (2.1).

تطبق المعادلة (2.18) للقيم الزمنية

اللابعدية التي تستند إلى أن نصف قطر تصريف البئر (t_{De}) أقل من (0.25)، أي أن البئر لازال في التأثير غير المحدود، أي:

$$t_{De} = \frac{2.64 \times 10^{-4} K_g t}{\phi \cdot \mu_g \cdot c_t \cdot r_e^2} \quad : t_{De} < 0.25 \quad (2.19)$$

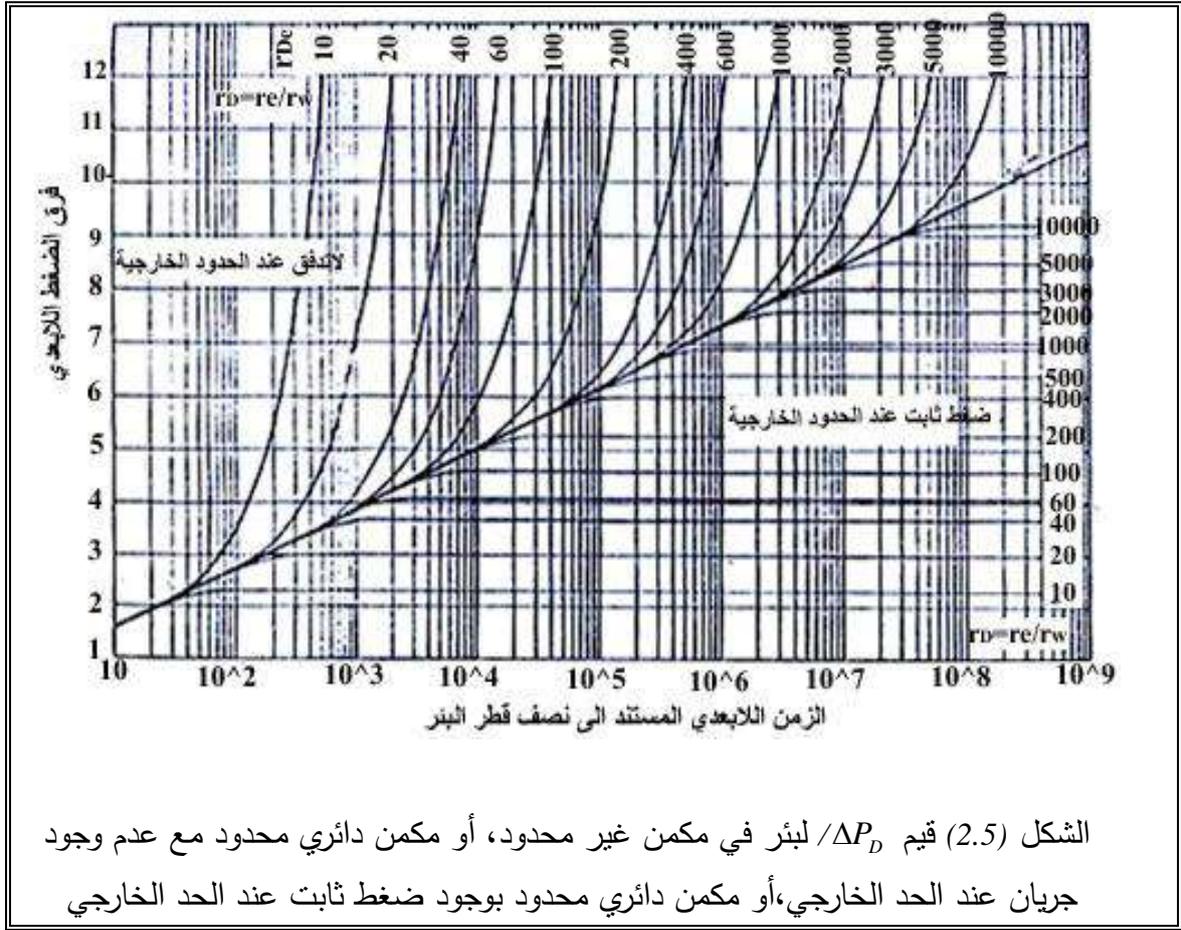
يمكن استخدام المعادلة (2.18) أيضاً في أية نقطة من المكمن، أي أن (r) ليس من الضروري دائماً أن تكون (r_w)، ومن أجل أن يكون هذا الحل صحيحاً يجب أن تكون قيمة الزمن اللابعدي المستند إلى نصف القطر المعني بالحساب أكبر من (100) أي أن:

$$t_D = \frac{2.64 \times 10^{-4} K_g t}{\phi \cdot \mu_g \cdot c_t \cdot r^2} \quad : t_D > 100 \quad (2.20)$$

٢- الحالة الثانية: معدل جريان ثابت عند جدران البئر، والمكمن محدود (الحالة المستقرة الزائفة) .

لقد بين كل من (*Van Everdingen And Hurst*) طريقة الحل بالنسبة للآبار التي وصلت إلى الحالة المستقرة الزائفة، والتي يمكن أن تطبق لحساب الضغط عند أي نصف قطر، وذلك عندما يكون معدل الجريان معلوماً، وتم وضع هذا الحل على شكل مخطط بياني، الشكل (2.5)، والذي يمثل علاقة (ΔP_D) مع (t_{Dw}) لقيم مختلفة من (r_{De})، وعلى شكل معادلة رياضية وهي:.

$$\Delta P_{Dw} = \frac{2 \times t_{Dw}}{r_{De}^2} + \ln(0.472 \times r_{De}) \quad (2.21)$$



الشكل (2.5) قيم ΔP_D لبئر في مكمن غير محدود، أو مكمن دائري محدود مع عدم وجود جريان عند الحد الخارجي، أو مكمن دائري محدود بوجود ضغط ثابت عند الحد الخارجي

٣- الحالة الثالثة: معدل جريان ثابت عند جدران البئر وضغط ثابت عند الحد الخارجي

للمكمن (الحالة المستقرة). إذا كان البئر ينتج من مكمن ذو ضغط ثابت عند الحد الخارجي،

هذا يعني أن البئر في شروط الحالة المستقرة، وسيكون حل معادلة الانتشارية كما يلي:

$$\Delta P_D = \ln(r_{De}) \quad (2.22)$$

في هذه الحالة سيكون الضغط الذي استخدم في تعريف (ΔP_D) هو (P_e) بدلا من (P_i) ،

حيث (P_e) هو الضغط الثابت عند الحد الخارجي، وبتعويض تعاريف المتغيرات اللابعدي

سيتم التوصل إلى المعادلة (2.15) التي تم ذكرها سابقا في حالة جريان الحالة المستقرة .

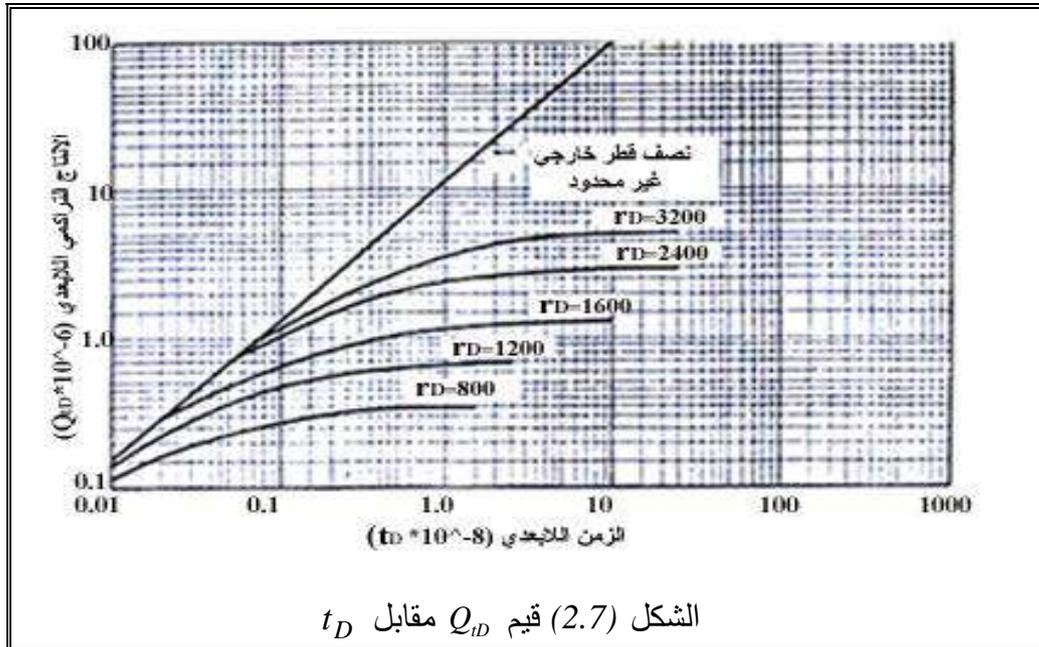
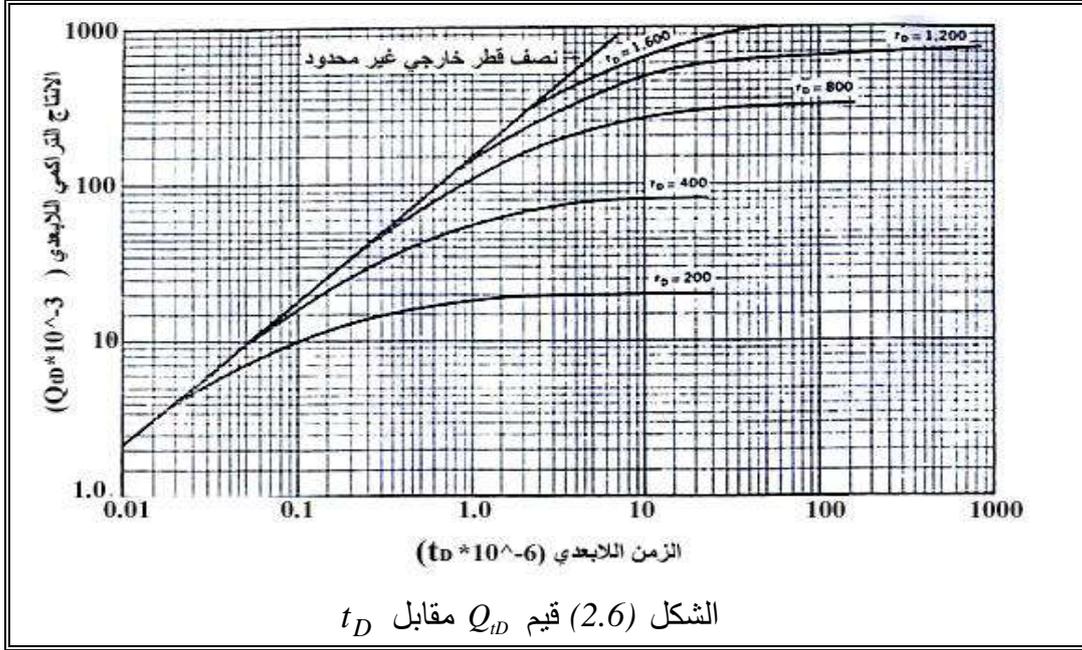
٤- الحالة الرابعة: ضغط ثابت للبئر .

إن حل معادلة الانتشارية عند ضغط ثابت للبئر، يمكن أن يعبر عنه بدلالة الانتاج

التراكمي اللابعدي (Q_{id}) ، حيث يعرف (Q_{id}) كما يلي:

$$Q_{id} = \frac{G_p \bar{Z} T}{0.111 \phi h r_w^2 C_i (P_i^2 - P_w^2)} \quad (2.23)$$

رسمت قيم (Q_{td}) كدالة للزمن ونصف القطر اللابعيين على شكل مخطط بياني، الشكل (2.6) والشكل (2.7) يوضحان قيم (Q_{td}) مقابل (t_D) .



٢-٣-٣-٣-٢ جريان الحالة المستقرة الزائفة: (Pseudo-Steady-State Flow)

تحدث إذا تغيّرت ظروف الجريان الانتقالي مع الزمن بمعدل ثابت في أي نقطة من الممكن، وهذه الحالة يمكن تحليلها بشكل أسهل من حالة الجريان الانتقالي. وتسمى هذه

الحالة في بعض المراجع بحالة الجريان شبه المستقرة (Semi-Steady State Flow). يوضح الشكل (2.8) منحنى توزيع الضغط ومعدل الجريان للحالة المستقرة الزائفة، والتي تشبه الحالة غير المستقرة باستثناء أنه في هذه الحالة يبقى معدل الجريان عند جدران البئر (q_w) ثابتاً، وهذا يمكن مقارنته بالبئر الذي ينتج بمعدل ثابت، أو البئر الذي يكون فيه معدل الضخ ثابتاً.

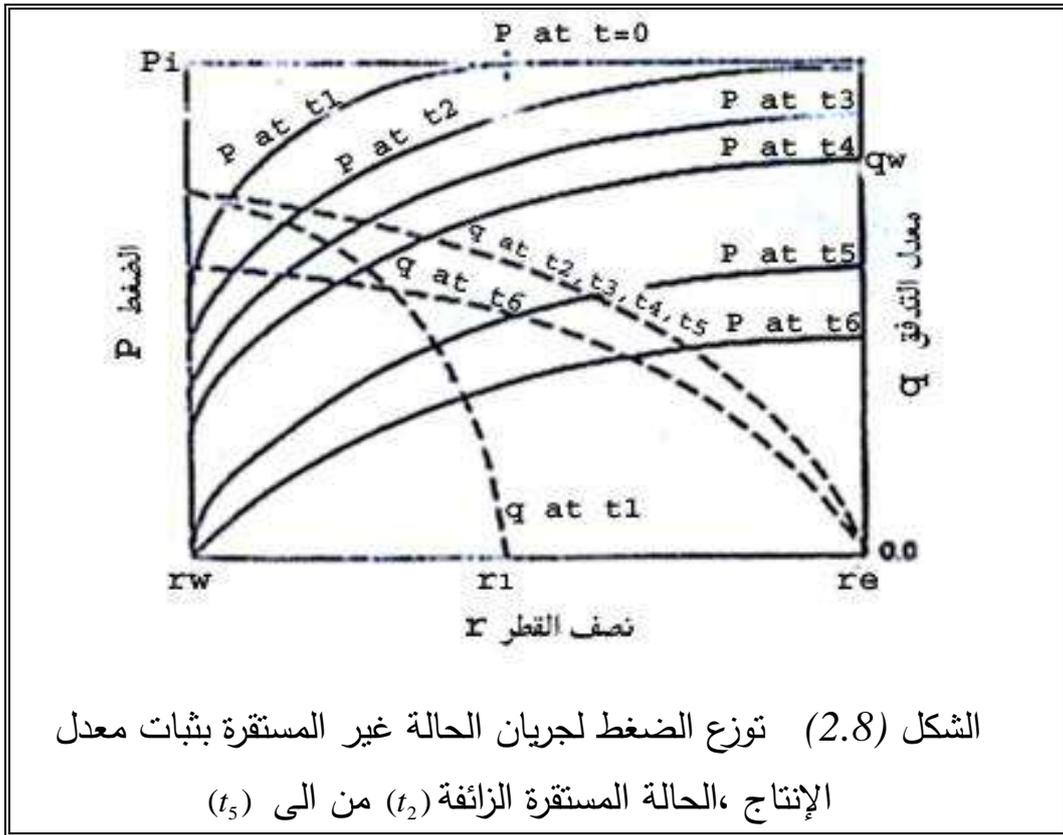
عند الزمن ($t=0$) يكون الضغط ضمن المكمن ثابتاً ويساوي (P_i)، وبعد فترة إنتاج قصيرة (t_1) بمعدل إنتاج ثابت، سيحدث انخفاضاً ملموساً في الضغط في جزء صغير فقط من المكمن، وبناءً على ذلك سيتأثر المكمن بعملية الإنتاج إلى نصف قطر مقداره (r_1) فقط، ومع استمرار الإنتاج بمعدل ثابت سوف يعاني المكمن من هبوط ملحوظ في الضغط الكلي كما هو موضح عند (t_2)، و بعد فترة وجيزة من تأثر الضغط الكلي للمكمن سيصبح التغير في الضغط مع الزمن عند كل أنصاف الأقطار في المكمن ثابتاً بحيث يكون توزيع الضغط في أزمنة لاحقة متوازياً، كما هو موضح عند الأزمنة (t_3) و (t_4) و (t_5) وستستمر هذه الحالة مع تغيرات ثابتة في الضغط مع الزمن حتى الوصول إلى عدم قدرة المكمن على إعطاء معدل ثابت للجريان في البئر، وبالنتيجة فإن الحالة المستقرة الزائفة هي حالة خاصة لجريان الحالة غير المستقرة، يكون المكمن في هذه الحالة لطيلة فترة حياته، ومعادلة الجريان هي:

$$q_{sc} = \frac{703 \times 10^{-6} K_g \cdot h (\bar{P}_R^2 - P_w^2)}{T \cdot \mu_g \cdot Z \cdot \ln(0.472 r_e / r_w)} \quad (2.24)$$

إن التأثيرات الناتجة عن الاضطراب والظاهرة السطحية يمكن إدخالها في المعادلة (2.24)

$$q_{sc} = \frac{703 \times 10^{-6} K_g \cdot h (\bar{P}_R^2 - P_w^2)}{T \cdot \mu_g \cdot Z \cdot [\ln(0.472 r_e / r_w) + S + D \cdot q_{sc}]} \quad (2.25) \quad \text{كما يلي:}$$

$$\bar{P}_R^2 - P_w^2 = \frac{1422 T \cdot \mu_g \cdot Z \cdot q_{sc}}{k \cdot h} [\ln(0.472 \times r_e / r_w) + S + D \cdot q_{sc}] \quad (2.26) \quad \text{أو:}$$



تم استنتاج كافة المعادلات الواردة في الفقرات السابقة على أساس أن الإنتاج يتم من بئر يقع في مركز مكمن دائري والذي نادراً ما يمثل الحالة الواقعية، وعلى اعتبار أن سلوكية الضغط تعتمد على شكل المكمن وموقع البئر بالنسبة لحدود المكمن، كما أن الزمن اللازم للوصول إلى الاستقرار أو جريان الحالة المستقرة الزائفة يعتمد أيضاً على هذه العوامل، لذلك تم تطوير المعادلات السابقة من قبل (Dietz) لتشمل هذه العوامل، بالنسبة للحالة غير المستقرة تصبح المعادلة (2.18) كما يلي:

$$\Delta P_D = 0.5 \left[\ln \left(\frac{A t_{DA}}{r_w^2} \right) + 0.809 \right] \quad (2.27)$$

وبالنسبة للحالة المستقرة الزائفة تصبح كما يلي:

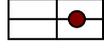
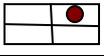
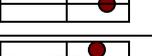
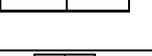
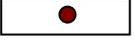
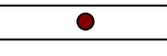
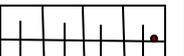
$$\Delta P_D = 0.5 \left[\ln \left(\frac{A}{r_w^2 \cdot C_A} \right) + 0.809 \right] + 2\pi t_{DA} \quad (2.28)$$

يستند حساب (t_{DA}) على مساحة التصريف (A) ويعرف كما يلي:

$$t_{DA} = \frac{2.64 \times 10^{-4} k_g \cdot t}{\phi \cdot \mu_g \cdot c_t \cdot A} \quad (2.29)$$

يمكن الحصول على العامل (C_A) إضافة إلى قيمة (t_{DA}) المطلوبين للوصول إلى جريان الحالة المستقرة الزائفة من الجدول رقم (2.2) .

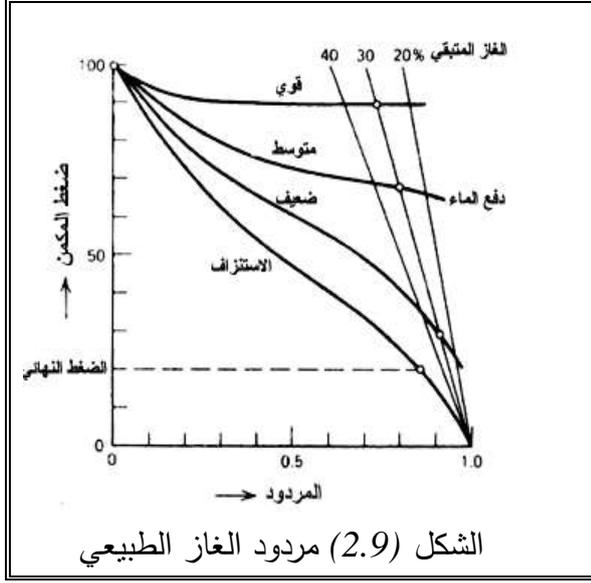
الجدول (2.2) أشكال عوامل الحالة المستقرة الزائفة لمكامن مختلفة

في المكامن المحدودة	$\ln C_A$	C_A	الشروط المستقرة من أجل $t_{DA} >$	في المكامن المحدودة	$\ln C_A$	C_A	الشروط المستقرة من أجل $t_{DA} >$
	3.45	31.6	0.1		1.58	4.86	1
	3.43	30.9	0.1		0.73	2.07	0.8
	3.45	31.6	0.1		1	2.72	0.8
	3.32	27.6	0.2		-1.46	0.232	2.5
	3.3	27.1	0.2		-2.16	0.115	3
	3.09	21.9	0.4		1.22	3.39	0.6
	3.12	22.6	0.2		1.14	3.13	0.3
	1.68	5.38	0.7		-0.5	0.607	1
	0.86	2.36	0.7		-2.2	0.111	1.2
	2.56	12.9	0.6		-2.32	0.098	0.9
	1.52	4.57	0.5	 في مكامن الدفع المائي	2.95	19.1	0.1
	2.38	10.8	0.3	 في المكامن الغير معروفة الخصائص الإنتاجية	3.22	25	0.1

٢-٤ - تطور حقول الغاز (Gas Field Development)

إذا كان المكمن وحدة مغلقة (لا توجد طبقة مائية أسفلها) فإنه يدعى باسم مكمن استنزافي أو مكمن حجمي، وإن مردود هذا النوع من المكامن سيستمر بشكل جيد حتى

الضغط النهائي والذي هو أخفض ضغط يمكن عنده أن نستخرج غاز من بئر ما بمعدل مقبول لتغطية تكاليف عملية الإنتاج.



إن نقطة تقاطع الخط الذي يمثل الضغط النهائي مع المنحني الذي يمثل الاستنزاف هي النقطة المثالية اقتصادياً لاستخراج الغاز (أي هي النقطة التي تمثل المردود المثالي اقتصادياً) والتي تمثل في هذه الحالة بين (٨٠-٩٠ %) من احتياطي الغاز، الشكل (2.9) يبين العوامل المؤثرة على عامل المردود الغازي. إن أغلب المكامن الغازية ذات قاعدة مائية سفلى وعند هبوط ضغط الغاز في

المكمن فان المياه ستبدأ بالجريان والدخول إلى المكمن ويدعى هذا بالتعدي المائي (Water Encroachment) والإنتاج هنا يكون بالدفع المائي (Production by Water Drive) والذي سيؤدي إلى الحفاظ على ضغط المكمن إلى حد ما. يشير الشكل (2.9) إلى ثلاثة أنواع من الدفع المائي (ضعيف و متوسط و قوي) والذي يبين أن مكمن ذو دفع مائي قوي يحافظ على ضغط يعادل القيمة الأولية لضغط المكمن ولكن من الصعب استخراج أكثر من (٦٠ %) من الاحتياطي والذي يقابل (٨٠-٩٠ %) في مكمن حجمي وكلما قلت قوة الدفع المائي سيكون المردود النهائي أعلى وذلك لان الماء لا يزيح كامل الغاز وإنما ستبقى كمية معتبرة من الغاز محجوزة بسبب السرعة الكبيرة لعبور المياه مما لا يعطي المجال لإشباع كامل المسامات بالمياه وبالتالي بقاء مجالات كبيرة مشبعة بالغاز لم يتم إزاحتها، بينما المردود النهائي عند الدفع المائي الضعيف جداً يمكن أن يكون أعلى بقليل من المكمن الحجمي، وترتبط قوة الدفع المائي بثلاثة عوامل هي (النفوذية ، أبعاد المكمن ، الزمن) كما يلي:

١- كلما قلت نفوذية المكمن كلما ضعف الدفع المائي.

١- كلما اتسع المكمن كلما ضعف الدفع المائي وذلك بسبب زيادة حجم الماء اللازم للمحافظة على الضغط.

٢- أما بالنسبة لعامل الزمن فإنه إذا كانت كمية الغاز المنتجة عالية فإن ذلك سيتطلب كميات كبيرة من المياه خلال زمن قصير وبالتالي سيكون الدفع المائي ضعيفاً، ولذات الحقل وبمعدل إنتاج قليل من الغاز فإن الدفع المائي سيكون كبيراً.

٣- نوع الخزان حيث تجتاح المياه مناطق الغاز في المكامن الشقية أو الشقية المسامية بسرعة أكبر من المكامن المسامية مما يؤدي إلى انخفاض مردود الغاز. وبالنتيجة يجب على مهندس المخزون معرفة ما يلي:

١- شكل استنزاف الحقل.

٢- النفوذية وأهميتها بالاشتراك مع العوامل الأخرى.

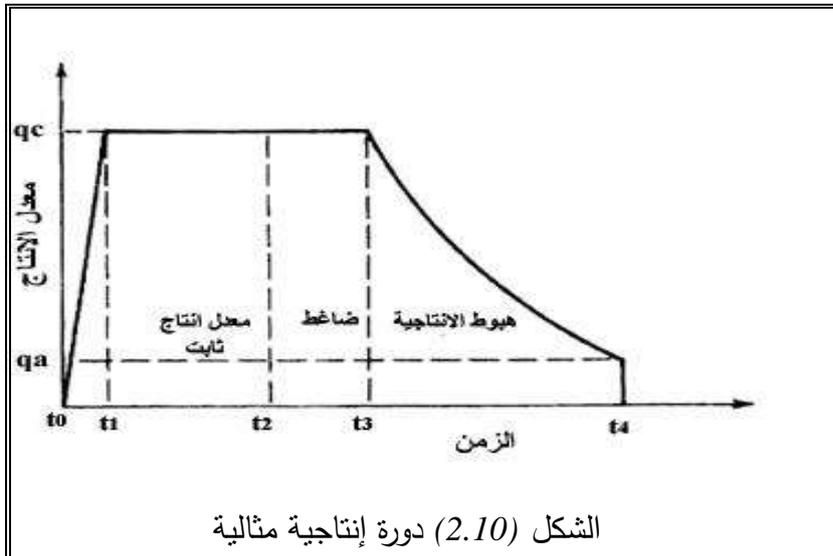
٣- ماهو دفع المكنم وبالتالي ما هي كمية الغاز التي يمكن إنتاجها إذا كان هناك دفع مائي.

٤- تقدير المردود والذي إذا ضرب بقيمة احتياطي الغاز فإننا سنحصل على قيمة الاحتياطي من الغاز القابل للاستخراج.

٢-٤-١ - نمط تطوير حقل الغاز: (Gas Field Development Pattern)

يتم تطوير المكامن النفطية والغازية وفقاً لدراسة خزنية تكاملية تتناول تحديد الاحتياطيات بدقة وتوضح الطرق المثلى للاستثمار من خلال شبكات آبار تطويرية يتم من خلالها وضع التصور المستقبلي للإنتاج والمردود الأمثل من الناحية الفنية والاقتصادية.

إن المشاكل الفعلية لإنتاج الغاز من المكنم يتم حلها بالطرق الأكثر اقتصادية من خلال وضع برامج للحفر والإنتاج، وهنا توجد بعض الأسئلة التي يجب الإجابة عليها وهي: ماهو عدد الآبار اللازمة ومتى سيتم حفرها وما هي كمية الإنتاج من كل بئر؟ ولتحديد

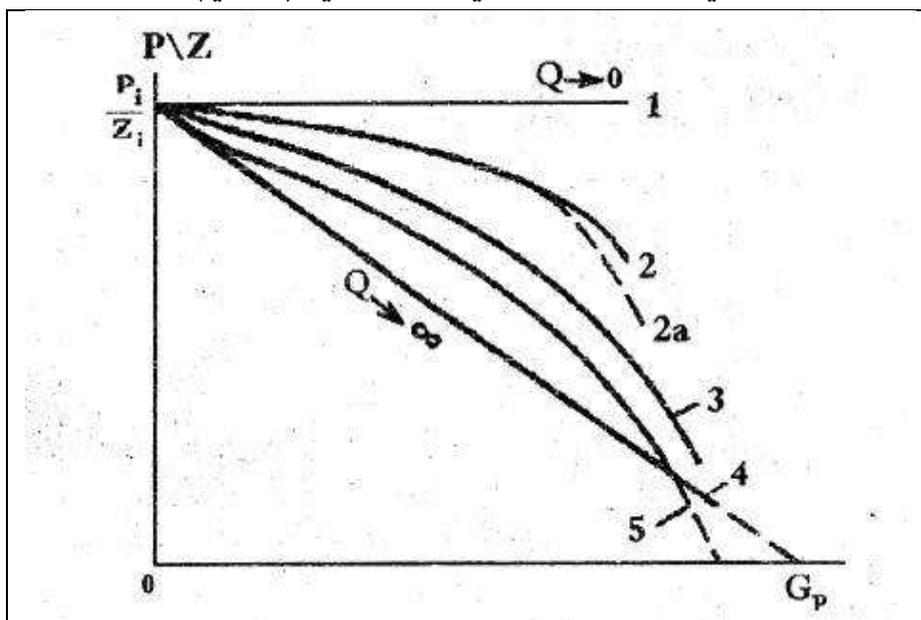


ذلك يجب إجراء عدة اختبارات إنتاجية على أول بئر استكشافي والتي يجب أن تكمل باختبارات أخرى ستضاف إليها في آبار تقييمية أخرى في

تواريخ لاحقة، الشكل (2.10) يبين دورة العمر الإنتاجي المثالي لمكمن غازي، ومنه نرى أنه عند الزمن (t_0) بعد اكتشاف المكمن يجب تأمين منظومة التجميع ومنظومة خط المواسير لنقل الغاز من الحقل إلى نقطة الاستهلاك وذلك قبل أن يبدأ إنتاج الغاز، خلال الزمن ($t_0 \rightarrow t_1$) يحصل تطوير للحقل بمعدل سريع بحيث نصل إلى كمية إنتاج الغاز المتعاقد عليها (المطلوب إنتاجها من الحقل) (q_c) وهنا يجب رفع الضغط إذا كان ضغط خط النقل يتطلب ذلك، وعند الزمن (t_1) تكون الاستطاعة الاسمية اكبر من (q_c)، في الزمن (t_2) ستبدأ سعة إنتاج المكمن مع التجهيزات بالهبوط وبالتالي يجب إضافة تجهيزات ضغط (ضواغط) للحفاظ على قيمة (q_c) أطول مدة ممكنة ويتم الحفاظ على قيمة معدل الإنتاج (q_c) حتى زمن وليكن (t_3) عندها سيهبط معدل الإنتاج حتى يصبح عائد بيع الغاز بالكاد يفي تكاليف التشغيل عند الزمن (t_4) وهذا ما يسمى بالحد الاقتصادي فنكون قد وصلنا إلى معدل الإنتاج النهائي (q_a) والذي يقابله الضغط النهائي للمكمن (P_a) حيث يتم بعده توقيف الإنتاج وهجر المكمن.

٢-٥- العوامل المحددة لطبيعة العلاقة بين (P/Z) وكمية الغاز المنتجة

يتعلق معدل انخفاض الضغط الطبقي في المكمن وخاصة التي تعمل منها على نظام الدفع المائي بالكثير من العوامل. ان رسم العلاقة بين الضغط الطبقة الوسطي المنسوب الى (Z) وبين الكمية التراكمية المنتجة من الغاز - الشكل (2-11) - يفيد في تحليل انظمة الطبقة الغازية وما يجري ضمنها ، كما يفيد في تحديد الاحتياطي الجيولوجي (الأولي) من الغاز.



الشكل (2.11) يبين نماذج لعلاقة (P/Z) مع (Gp)

يصف الخط المستقيم رقم (4) نظام دفع الغاز في الطبقة .اما الخطوط (1) و(2) و(3) فتصف نظام دفع الماء حسب شدة الدفع.

إذا كان انخفاض (P/Z) عند معدل سحب (Q_2) كما في المنحني رقم (2) ، وعند معدل سحب (Q_3) كما في المنحني رقم (3) فمن المنحني نجد ان $(Q_2 < Q_3)$.

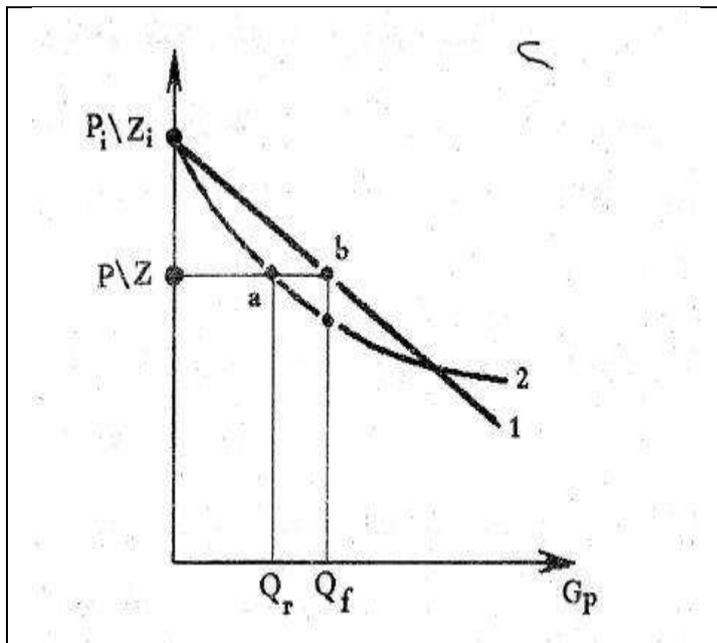
إذا كان دفع الماء قويا ، فان الضغط الطبقي لايتغير مع الزمن أو ان تغيره قليل جدا في حالة السحب القليل جدا للغاز، كما يظهر في المنحني رقم (1).

بهذا الشكل نجد ان منحنيات تغير (P/Z) مع (G_p) تقع في المجال بين المنحنيات رقم (1) ورقم(4)، الا ان الجزء الاخير من منحنيات التغير عند نظام دفع الماء يكون مختلفا جدا ويمكن ان يتقاطع مع المنحني رقم (4) الذي يمثل نظام الدفع الغازي، كما يبين ذلك المنحني رقم (2.11) والذي يعبر عن معدلات مرتفعة لاستثمار المكن.

إذا كانت المنطقة المائية المحيطة للمنطقة الغازية في المكن مغلقة (لايوجد تغذية لها) فانه يعبر عن انخفاض الضغط في مثل هذه الحالة بالمنحني رقم (2a).

ويكون المنحني بالشكل رقم (2) عندما توجد تغذية للمنطقة المادية .

احيانا قد تكون العلاقة $(\frac{P}{Z} = f(G_p))$ عند نظام دفع الغاز غير خطية ، وتكون القيم المقاسة اعلى أو ادنى من القيم الحقيقية لها، فعندما تكون القيم المقاسة ادنى من القيم الحقيقية الشكل رقم (2.12) ، يكون سبب ذلك التسرب الغازي في الطبقات الاعلى أو الادنى ، أو إلى المكامن المجاورة نتيجة لعمليات الاستثمار.



الشكل (2.12) يبين تأثير تسرب الغاز

على علاقة (P/Z) مع (G_p)

حيث ان :

المنحني (1) بدون تسرب غاز.

المنحني (2) بوجود تسرب غاز.

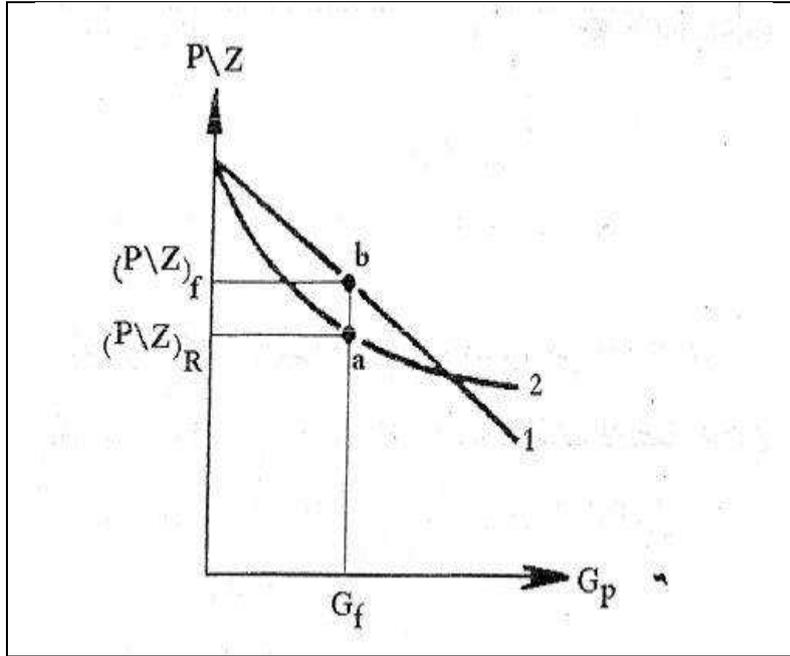
من الشكل (2.12) يبين ان القيمة المقاسة عند النقطة (a) تقابلها القيمة الحقيقية المنتجة من الغاز من الطبقة عند النقطة (b) ، لهذا نحصل على المنحني رقم (2) من قياسات الإنتاج التراكمي المقابلة لقيم (P/Z) وهذا الخط ذو قيم ادنى من القيم الحقيقية. بعد مرحلة معينة من الإنتاج يتقاطع الخط (2) مع الخط (1) ويصبح اعلى منه وهذا ممكن ان يكون بسبب مايلي:

١- ظهور نظام دفع الماء وتوقف التسرب إلى الطبقات الأخرى.

٢- أو تغير اتجاه حركة .

٣- عدم انتظام ارتشاح التشكيلات المنتجة بالسماكة.

لذلك عند ايقاف البئر وقياس الضغط الطبقي سنسجل ضغوطا منخفضة تصف الطبقات المنتجة حاليا وبالتالي فان كمية الغاز المنتجة (G_F) يقابلها الضغط المنسوب $(P/Z)_R$ المسجل وليس الحقيقي $(P/Z)_F$ ، وعندها سنحصل على النقطة (a) اسفل النقطة (b) مباشرة، الشكل (2.13).

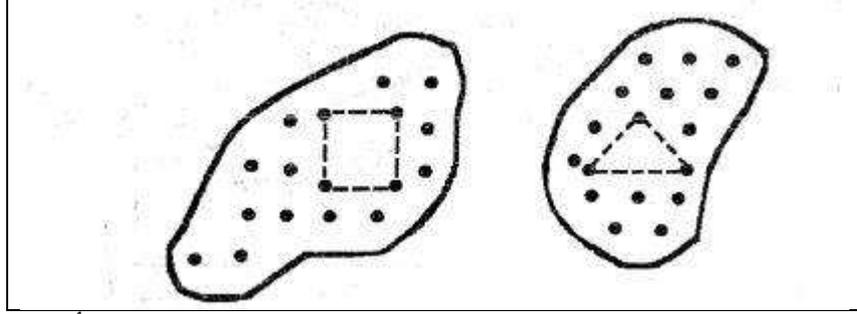


الشكل (2.13) يبين تأثير عدم انتاج الطبقات بوقت واحد على العلاقة $(\frac{P}{Z} = f(G_p))$

٢-٦- انظمة توزيع الآبار وميزاتها عند استثمار المكنم الغازي:

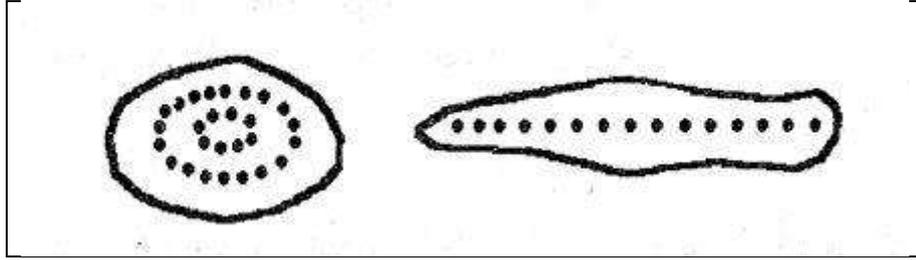
تؤثر شبكة توزيع الآبار على جميع المؤشرات التقنية الاقتصادية لاستثمار الحقل الغازي، وعلى المنشآت الصناعية التابعة له. اعتمادا على الخبرة النظرية والعملية تم الحصول على انظمة توزيع للآبار واسعة الانتشار هي:

١- توزع منتظم على شكل مربعات أو مثلثات ، الشكل (14-2)



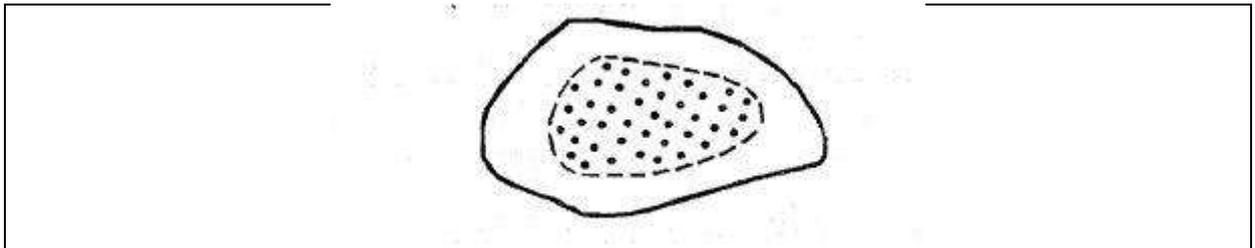
الشكل (2.14) يبين توزيع منتظم على شكل مربعات أو مثلثات

٢- توزيع الآبار على شكل صفوف دائرية أو سلسلة على طول المكنم الشكل (15-2)



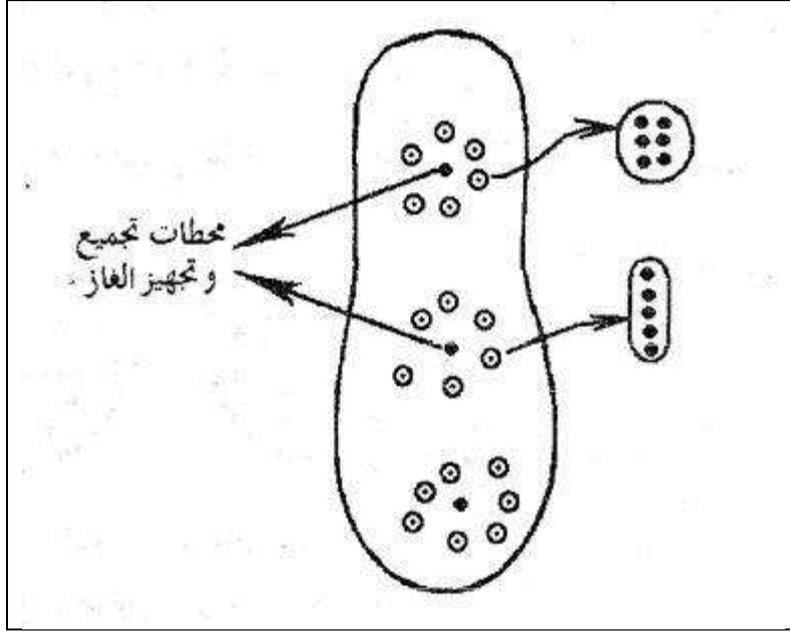
الشكل (2.15) يبين التوزيع السلسلي أو الدائري للآبار

٣- توزيع الآبار في الجزء المركزي للمكنم الشكل (16-2)



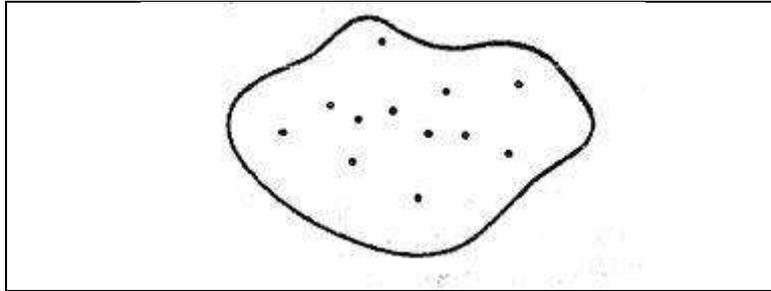
الشكل (2.16) يبين التوزيع المركزي للآبار

٤- توزع الآبار على شكل شجيرات الشكل (2.17)



الشكل (2.17) يبين توزيع الآبار على شكل شجيرات

٥- توزيع غير منتظم للآبار على المساحة المشبعة بالغاز الشكل (2,18)



الشكل (2,18) يبين التوزيع غير منتظم للآبار

٢-٧- عامل المردود الغازي:

يوصف عامل المردود الكلي للحقول الغازية وحقول المكثفات الغازية بعامل المردود الحجمي الكلي (R_F) وهو النسبة بين حجم الغاز المنتج من الطبقة (G_p) إلى الاحتياطي الجيولوجي (G) ويجب التمييز بين عامل المردود النهائي والحالي. ويعبر عن عامل المردود بالعلاقة التالية :

$$R_F = \frac{G_p}{G} \times 100 = \left(1 - \frac{G_a}{G}\right) \times 100 \quad (2.30)$$

حيث ان:

G_p = كمية الغاز التراكمية المنتجة.

G_a = كمية الغاز المتبقية في المكن.

G = الاحتياطي الجيولوجي.

إن عامل المردود (R_F) تابع للضغط النهائي (ضغط هجر البئر) والنفوذية ونظام عمل المكن، فكلما انخفضت قيمة الضغط النهائي ستزداد كمية الغاز القابل للاستثمار، وتعتمد قيمة الضغط النهائي للبئر على كل من سعر الغاز، مؤشرات إنتاجية الآبار، حجم الحقل، ضغط تشغيل خط الإنتاج وذلك بالنسبة للحقول الصغيرة أما في الحقول الكبيرة فيعتبر تركيب وحدة ضواغط غاز ثابتة مقبولاً اقتصادياً.

تملك مكامن الغاز ذات الدفع المائي عادة عامل مردود أخفض من مكامن الغاز المغلقة وذلك بسبب ضغط الهجر العالي الناتج عن التعدي المائي داخل الآبار المنتجة. تلعب النفوذية أيضاً دوراً هاماً في عامل مردود الغاز عند الإنتاج من المكامن الغازية المغلقة، لذلك عند ثبات العوامل الأخرى فإن النفوذية العالية ستؤدي إلى عامل مردود عال. عندما يكون الضغط النهائي معروفاً فإن عامل المردود يمكن حسابه معبراً عنه كنسبة مئوية من حجم الغاز الأولي المتواجد في المكن كما يلي:

١- للمكامن المغلقة:

$$R_F = 100 \times \left(\frac{B_{ga} - B_{gi}}{B_{ga}} \right) = 100 \times \left(1 - \frac{B_{gi}}{B_{ga}} \right) = 100 \times \left(1 - \frac{P_a \cdot Z_i}{P_i \cdot Z_a} \right) \quad (2.31)$$

٢- للمكامن ذات الدفع المائي:

$$R_F = \frac{100(S_{gi} \cdot B_{ga} - S_{ga} \cdot B_{gi})}{S_{gi} \cdot B_{ga}} \quad (2.32)$$

٢-٨- انظمة استثمار الحقول متعددة الطبقات

يحتوي الكثير من الحقول الغازية وحقول مكثفات غازية على عدة طبقات منتجة يمكن استثمارها بطريقتين هما:

- ١- الطريقة الأولى : تعتمد على استثمار كل طبقة من خلال ابارها.
- ٢- الطريقة الثانية : تعتمد على استثمار الطبقات بوقت واحد وبشكل منفصل من الآبار ذاتها.

يتأكد وجود اتصال غازوديناميكي بين الطبقات عند تحقيق الشروط التالية في الوقت نفسه:

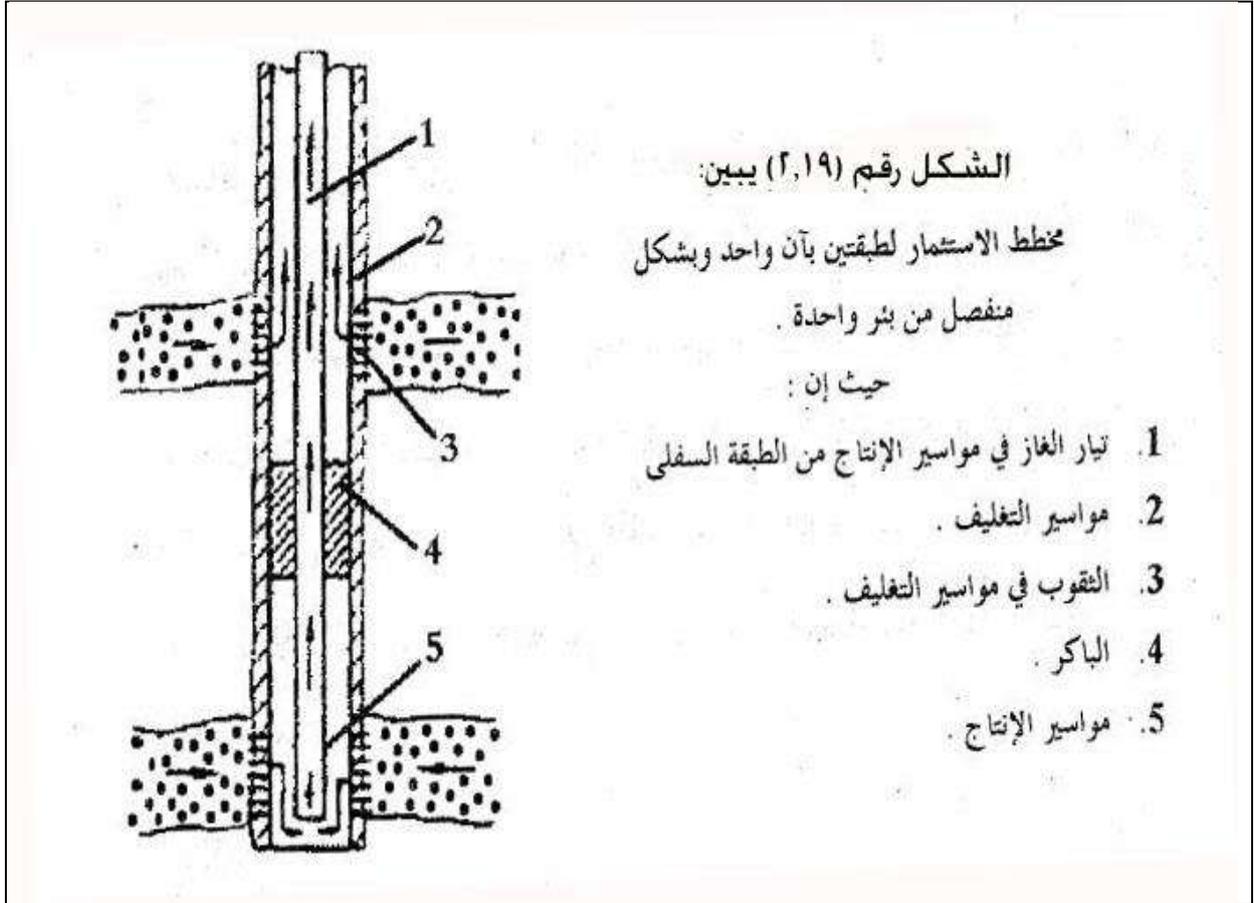
- ١- يخضع توزيع الضغوط الطبقيّة الأولى في التشكيلات للصيغة البرومتريّة.
 - ٢- تقع خطوط التماس ماء-غاز على عمق واحد (خط واحد).
 - ٣- يكون تركيب الغازات واحدا في جميع التشكيلات .
- أما عندما لا تتحقق الشروط السابقة ، فان توزيع الضغط الأولي في التشكيلات يخضع للصيغة الهيدروستاتيكية.
- وهنا نستطيع التأكيد على وجود العزل بين التشكيلات، أي عدم وجود اتصال غازوديناميكي بين الطبقات ، ويمكن ان يكون هناك اتصال هيدروديناميكي في منطقة التشبع بالماء.

المزايا الاقتصادية التقنيّة لاستثمار في الوقت ذاته وبشكل منفصل هي:

- ١- تقليل عدد الآبار اللازم لاستثمار طبقتين معا.
 - ٢- تقليل الطول العام لخطوط لنقل الغاز الطبيعي الصناعي.
 - ٣- تقليل رأس المال العام الموضوع في بناء الآبار والتجهيزات السطحية.
 - ٤- تخفيض عدد عمال الخدمة.
 - ٥- تسريع ادخال مكامن مكثفات غازية جديدة في الاستثمار.
- يعتمد اختيار وحدة الاستثمار على:

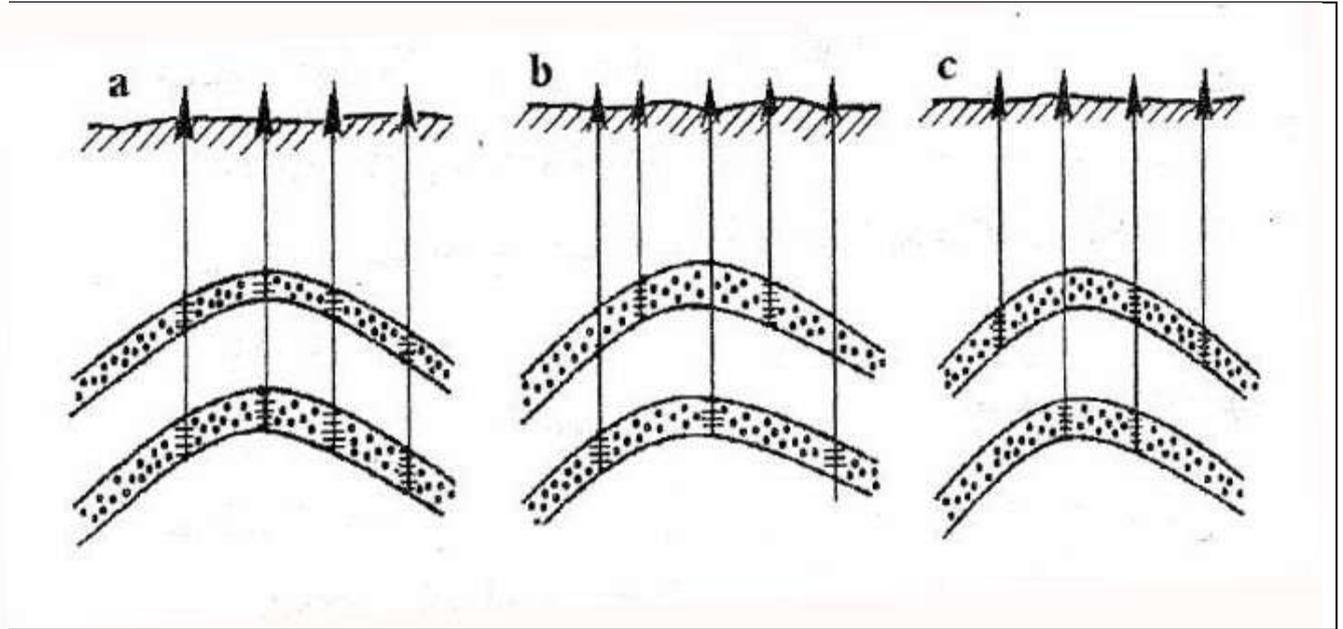
- ١- تركيب الغازات الطبقيّة.
- ٢- فرق الضغط بين الطبقات ودرجة حرارة الغاز.
- ٣- نظام عمل الطبقات والمسافة العمودية بينها.

عند الإنتاج من طبقتين معا من خلال بئر واحدة ، يتطلب ذلك وضع باكر في الفراغ الحلقي بين مواسير التغليف ومواسير الإنتاج ويثبت بين الطبقتين ، بحيث تنتج من الطبقة السفلى بواسطة مواسير الإنتاج، ومن الطبقة العليا يتم انتاج الغاز من خلال الفراغ الحلقي. كما هو موضح بالشكل رقم (2.19)



٢-٨-١- الحقول ذات الطبقات الغازية المنفصلة:

يمكن استثمار الحقول الغازية ذات الطبقات المنفصلة بشكل منفصل أو متصل أو الاثنین معا ، حيث تستخدم الآبار للإنتاج من طبقة واحدة أو من عدة طبقات ، الشكل (2.20)

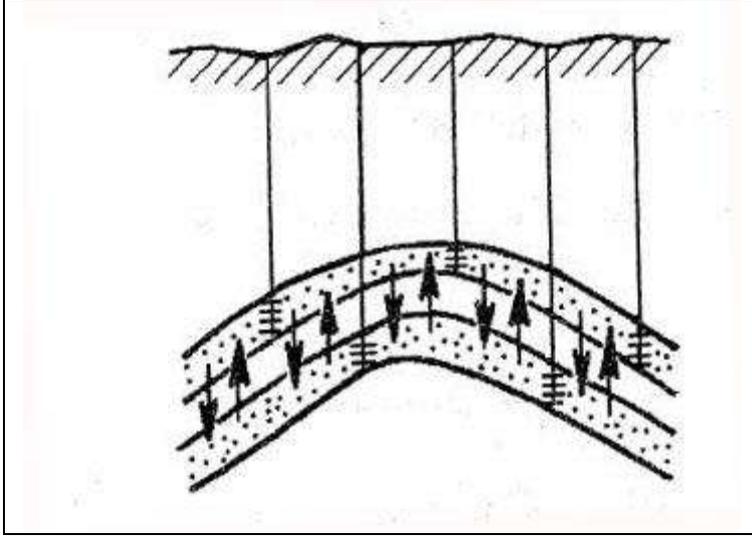


الشكل (2.20) يبين مخطط السحب من طبقتين

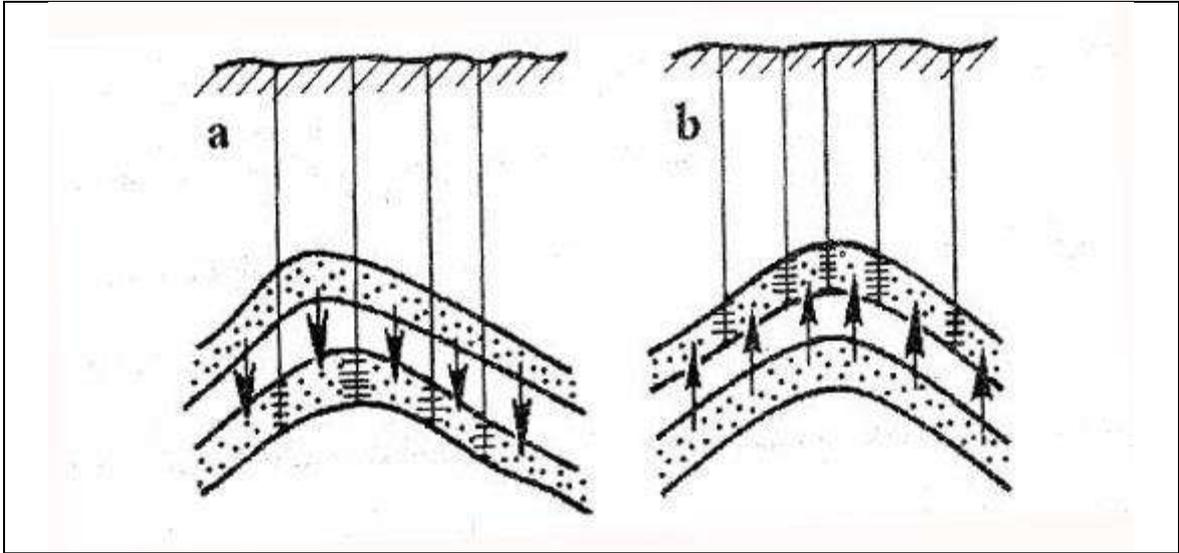
a- بان واحد b- بشكل منفصل c- بشكل منفصل ومتصل معا

نستخدم شبكة الآبار المنفصلة في الحالات التالية:

- ١- عندما تتميز كل طبقة بإنتاجية عالية.
 - ٢- عندما تكون احدى الطبقات غازية فقط ، بينما تحوي الأخرى على مكثفات غازية.
 - ٣- عندما تحوي احدى الطبقات على غازات حامضية، بينما لا تحويها الطبقة الأخرى.
 - ٤- عند الاختلاف الكبير في قيمة الضغوط الطبقيّة الأولى بين الطبقات.
 - ٥- عند استثمار احدى الطبقات بنظام تكنولوجي يختلف عن الآخر، على سبيل المثال احد الخزانات من الصخر القاسي بينما الخزان الاخر من الصخر الرخو.
- بغياى المحظورات السابقة ، يصبح استخدام شبكة آبار واحدة لعدة طبقات اقتصاديا.
- عند استثمار عدة طبقات بشكل منفصل ، فان عدد الآبار التي تحقق الإنتاجية المطلوبة بإنتاجية ثابتة يفوق عدد الآبار المستخدمة المستخدمة في الاستثمار المشترك لعدة طبقات.
- ٢-٨-٢- الحقول ذات الاتصال الغازوديناميكي بين الطبقات:
- يؤثر الاتصال الغازوديناميكي بين الطبقات، بشكل كبير، على كل المؤشرات التقنية الاقتصادية. اشكال الاتصال مبينة في الشكلين (2.21) و (2.22).



الشكل (2.21) يبين شبكات
آبار منفصلة عند وجود اتصال
غازوديناميكي بين الطبقات



الشكل (2.22) يبين استثمار حقل مكون من طبقتين عند وجود اتصال غازوديناميكي بينهما
a - الإنتاج من الطبقة السفلية
b - الإنتاج من الطبقة العلوية

٢-٩ - طرق زيادة إنتاجية الآبار الغازية:

لزيادة إنتاجية الآبار استعملت ومنذ زمن طويل عدة طرق والتي تختلف فيما بينها بالمسافة التي تؤثر على الطبقة وكذلك بطريقة تطبيقها وتنقسم إلى مجموعتين هما:

١- طرق ذات نصف قطر (المسافة من مركز البئر وحتى اخر نقطة لتأثيرها) تأثير صغير وتنقسم بدورها إلى الطرق التالية:

١- المعالجة بمواد منشطة لتقليل التوتر السطحي.

٢- الطرق الحرارية والتي تعتمد على تسخين جدران البئر.

٣- المعالجة الكيميو- حرارية.

٤- اعادة التنقيب مقابل الطبقة المنتجة

٢- طرق بنصف قطر تأثير كبير وتقسم بدورها إلى الطرق التالية:

١- التحميص ، ٢- التشقيق الهيدروليكي ، ٣- تفجير الطبقات

في البداية ، اعتمدت الطرق الاساسية لتحسين جريان الغاز على المعالجة بحمض كلور الماء والتشقيق ، ومن ثم اصبحت الطرق الاكثر انتشارا هي المعالجة بالحامض والكحول ، أو الحمض الرغوي والكحول، أو تنقيب الآبار تحت الضغط ، أو التشقيق الهيدروليكي.

يتعلق اختيار طريقة التأثير على المنطقة القاعية من البئر بما يلي:

١- التركيب المنزولوجي والليتولوجي للصخر.

٢- المادة المسمنة للصخر المشبع بالغاز.

٣- ضغط ودرجة حرارة الطبقة الحاوية على الغاز.

٤- سماكة الطبقة المنتجة.

٥- درجة عدم التجانس للطبقة على طول المقطع.

ان الطرق المعروفة للتأثير على المنطقة القاعية للآبار الغازية هي:

٢-٩-١- الطريقة الفيزيوكيميائية:

تعتمد على المعالجة بحمض كلور الماء ، أو المعالجة الحمضية الحرارية ، والمعالجة

بالمواد المنشطة السطحية ، وتجفيف المنطقة القاعية بالغاز.

تعطي عمليات التحميص العادي والحراري نتائج جيدة في الصخور الكربوناتية ضعيفة

النفوذية، كذلك الصخور الرملية التي يكون ملاطها الرابط بين الحبيبات كربوناتيا.

اما في الصخور الرملية التي يكون الملاط الرابط بينها غضاريا فتستخدم فيها بفعالية

طريقة التحميص بحمض فلور الماء وحمض كلور الماء.

تعتمد طريقة التحميص بحمض كلور الماء على فعالية اذابة الصخور الكربوناتية ، حيث

يؤثر عليها الحمض وفق التفاعلات التالية:

١- تفاعل (HCL) مع الصخور الكلسية:



٢- تفاعل (HCL) مع الصخور الدولوميتية:



بالعلاقة مع الشروط الطبقيّة من ضغط وحرارة، يستخدم حمض كلور الماء بتركيز يتراوح بين (٨-١٥) %.

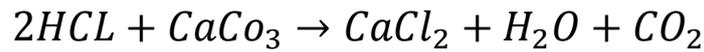
تستخدم مواد تسمى موانع تآكل (مثبطات التآكل) لمنع تآكل المعدات المعدنية أثناء عملية التحميص ، ومنها (فورمالين، اونيكل، سولفانول ، ديسولفانول) ومواد أخرى كثيرة. تستخرج نواتج التفاعل في عملية اعادة الإنتاج، ولتسهيل هذه العملية يتم اضافة منشطات للحمض تعمل على تقليل التوتر السطحي لنواتج التفاعل ، كالكحول وبعض المواد المنشطة السطحية.

تطبق هذه الطريقة لمعالجة الطبقة للأغراض التالية:

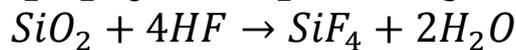
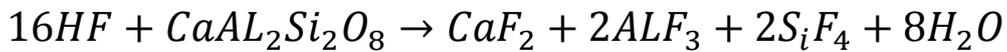
- ١- توسيع مسامات الصخور بجوار جدران البئر.
- ٢- تنظيف الشوائب الموجودة على جدران البئر مقابل الطبقة المنتجة أو تلك المتوضعة في القنوات التي تجري خلالها الموائع من الطبقة باتجاه البئر.
- ٣- توسيع وتنظيف الشقوق الموجودة في الصخور.
- ٤- تشكيل قنوات جديدة ذات عمق كبير ونفوذية عالية ضمن الجزء من الطبقة المجاور للبئر.
- ٥- توسيع قطر البئر.

٦- الغاء وجود منطقة ملوثة بجوار البئر ذات نفوذية اقل من النفوذية الفعلية للطبقة. للطبقات الخازنة والمؤلفة من الرمل مع كميات قليلة من الكلس فيستعمل خليط مؤلف من حمض كلور الماء (HCL) وحمض فلور الماء (HF) وذلك لان استعمال (HCL) بمفرده في هذه الحالة لايعطي نتائج ذات قيمة تذكر ، وفي مثل هذه الحالة يحصل مايلي:

١- يتم التفاعل مع ملاط الترابط الكلسي لحبيبات الرملية وفق التفاعلات التالية:



٢- يتفاعل حمض فلور الماء مع الرمل والغضار والتي يتالف منها الصخر وفق التفاعلات التالية:



نواتج تفاعل الحمض مع الصخر وهي كلور الكالسيوم تتحلل في الماء ويمكن ابعادها بسهولة من الطبقة، اما فلور السيليسيوم (SiF_4) وثنائي اكسيد الكربون (CO_2) تبقى بحالة غازية أو تتحلل بالماء وبالتالي يمكن ابعادها بسهولة من الطبقة ، لكن فلور الكالسيوم (CaF_2) وفلور الالمنيوم ($2AlF_3$) هي رواسب صعبة الذوبان بالماء لذلك تضاف مواد منشطة تساعد على انحلالها وبالتالي يمكن ابعادها من الطبقة.

لتحضير المحاليل الحمضية تضاف المواد المختلفة في تتابع معين كما يلي:

- ١- يصب الماء ويضاف اليه مانع التآكل (المثبط).
- ٢- يضاف مثبت التفاعل (حمض الخل وحمض الفلور)
- ٣- يضاف الحجم اللازم من (HCL) المركز المحسوب بتركيز يتراوح من (27.5% - 31%) ،ويسمى " بالحمض التقني" اذ يدخل فيه تركيز ضعيف للحديد وشوارد الكبريتيت ، ثم يحرك الجميع بهدوء.

٤- تضاف كمية كلور الباريوم المطلوبة ($BaCl_2$) .

٥- تضاف المواد المنشطة السطحية وتترك بعد تحريكها لترسيب وابعاد كبريتات الباريوم ($BaSO_4$).

وبذلك يمكن اعتبار المحلول الذي تم الحصول عليه جاهزا لمعالجة المنطقة القريبة من البئر.

يحدد تركيز الحمض في الشروط الحقلية اما بطريقة المعايرة أو باستخدام مقياس الكثافة (الاريومتر) ، وتعتبر طريقة المعايرة أكثر دقة لان مقياس الكثافة لاياخذ بعين الاعتبار الاضافات الأخرى.

يحدد الحجم اللازم من الحمض التجاري (المركز) ، المعلوم التركيز والكثافة من العلاقة التالية:

$$V_1 \times C_1 \times \rho_1 = V_2 \times C_2 \times \rho_2 \quad (2.33)$$

V_1 = حجم الحمض التجاري.

C_1 = تركيز الحمض التجاري.

ρ_1 = كثافة الحمض التجاري.

$V_2, C_2, \rho_2 =$ كثافة وتركيز وحجم المحلول الحمضي.

أما حجم الماء (V) فيحدد من العلاقة التالية:

$$V = V_2 - V_1 \quad (2.34)$$

مثال :

المطلوب تحضير (60m^3) من محلول حمض كلور الماء بتركيز (14%) من الحمض

التجاري ذي التركيز (24%) مع العلم ان:

- كثافة الحمض التجاري (1.1209 g/cm^3)

- كثافة المحلول الحمضي (1.0693 g/cm^3)

الحل:

من العلاقة (2.33) نجد ان الكمية المطلوبة من الحمض التجاري اللازمة لتحضير

(1 m^3) من المحلول (14 %) هي:

$$V_1 = \frac{V_2 C_2 \rho_2}{C_1 \rho_1} = \frac{1 \times 14 \times 1.0693}{1.1209 \times 24} = 0.556 \text{ m}^3 = 556 \text{ L}$$

اما كمية الماء فتحسب من العلاقة (2.34) كما يلي:

$$V = V_2 - V_1 = 1000 - 556 = 444 \text{ L}$$

ولتحضير (60 m^3) من المحلول الحمضي يلزمنا حمض تجاري:

$$60 \times 0.556 = 33.36 \text{ m}^3$$

وبالتالي فان كمية المياه اللازمة :

$$0.444 \times 60 = 26.6 \text{ m}^3$$

عند استخدام حمض الخل كمبطئ سرعة تفاعل يجب الأخذ بعين الاعتبار زيادة تركيز

الحلول الحمضي بشكل عام.

على سبيل المثال إذا اضيف إلى محلول حمض كلور الماء (5 %) من حمض الخل

بتركيز (100 %) يزداد التركيز العام بمقدار (3 %).

يحقق في البئر بمساعدة مضخات خاصة كمية تتراوح بين ($0.5 - 0.7 \text{ m}^3$) و حتى

($3 - 4 \text{ m}^3$) حمض لكل (1 m) من طول المواسير المثقبة، بشرط الا يزيد زمن تفاعل

الحمض من لحظة انتهاء الحقن عن (6-8) ساعات.

يتحدد نجاح عملية التحميض من نتائج اختبارات الآبار بعد المعالجة اذ يجب ان تزداد الإنتاجية عند فرق الضغط نفسه ، كما ستكون قيمة معامل الظاهرة السطحية (S) موجبة.

٢-٩-٢ - الطريقة الميكانيكية:

تتم اما بالتشقيق الهيدروليكي للطبقة أو الثقيب الهيدروليكي بالرمل أو التفجير النووي للطبقة.

تستخدم عادة عمليات التشقيق والثقيب والتفجير النووي في الطبقات ذات الصخور القاسية والصلبة جدا والتي تكون ضعيفة النفوذية والمسامية وذات ضغط عال. تؤدي طريق التشقيق الهيدروليكي إلى توسيع الشقوق في الطبقة أو تشكيل شقوق جديدة بمساعدة سائل التشقيق الذي يحقن في البئر عند ضغوط مرتفعة. ومن ثم المحافظة عليها في الوضع المفتوح من خلال حقن الرمل في الشقوق.

المواد التي تستخدم كسوائل تشقيق هي:

١- المستحلبات المائية المكثفانية.

٢- المستحلبات الحمضية المكثفانية.

٣- محلول الماء - ديسولفان.

٤- الكريوكسي ستيل و السيللوز و والجل الكيروسيني والحمضي وغيرهم.

تحقن مواد التشقيق تحت ضغوط مرتفعة (50 - 70 MPa) ويجهز البئر بشكل جيد لتحمل ذلك ، وتسجل بدء لحظة حدوث التشقيق على السطح بالزيادة المرتفعة لتقبل البئر أو انخفاض ضغط الحقن.

٢-٩-٣ - الطريقة المركبة:

تتم اما بطريقة التشقيق الهيدروليكي المذكورة سابقا مع المعالجة بالحمض، أو بالتثقيب الهيدروليكي بالرمل مع المعالجة بالحمض،

قبل القيام بعمليات التشقيق الهيدروليكي للطبقة يجب اتخاذ سلسلة من الإجراءات التحضيرية منها:

١- قياس معدل إنتاج البئر والضغط في قاع البئر عند مستوى الطبقة المنتجة.

- ٢- تنظيف قعر وحدران البئر مقابل الطبقة وذلك إذا تبين بالفحص وجود ترسبات أو حبيبات رملية في قاع البئر.
- ٣- فحص مواسير التغليف والتأكد من صلاحيتها وامكانية انزال مواسير الحقن مع الباكر حتى مستوى الطبقة.
- ٤- فحص مواسير الحقن وتنظيفها من الداخل.
- ٥- فحص رأس الحقن وتجريبه بضغط يساوي ضغط الحقن.
- ٦- عند عدم توفر معلومات عن استطاعة الطبقة لتقبل السائل فإنه يتم في البداية حقن كمية من المحلول الحمضي للتأكد من قابلية الطبقة للحقن.
- بعد إجراء هذه العمليات التحضيرية وتحضير السائل الذي سيحقن ، فإن عملية التشقيق الهيدروليكي تتم وفق المراحل التالية:
 - ١- يحقن سائل التشقيق وبالضغط الاعظمي لجهاز الحقن حتى تتصدع الطبقة وتحدث الشقوق.
 - ٢- يحقن سائل التشقيق مع الحبيبات الرملية للحفاظ على الشقوق مفتوحة وبالضغط الاعظمي أيضا وبدون انقطاع وبمعدل يساوي على الاقل المعدل الذي حقن به سائل التشقيق (الخال من الرمل) حيث نتلافى بذلك توضع الرمل على قعر البئر وبالتالي اعادة انسداد الشقوق بعد سحب السوائل من الطبقة.
 - ٣- تحقن كمية من السائل النظيف بحجم يساوي الحجم الداخلي لمواسير الحقن وحجم البئر مقابل الطبقة للتأكد من دخول سائل التشقيق بكامله في الطبقة.
 - ٤- يغلق البئر تحت الضغط ويترك زمنا يتراوح بين (48 hrs 24) .
 - ٥- يعاد فتح البئر ويخفض الضغط تدريجيا ويوضع البئر في الإنتاج بمعدل اقل من معدل الإنتاج قبل التشقيق وذلك لتلافي حمل الغاز للحبيبات الرملية من الشقوق ويزاد المعدل تدريجيا حت الوصول إلى المعدل المثالي للإنتاج قبل المعالجة.

الفصل الثالث

بحث الآبار الغازية

١-٣- الهدف من بحث الآبار الغازية:

يتم اختبار آبار النفط أو الغاز عند المراحل المختلفة من الحفر والإكمال والإنتاج والتي تهدف إلى:

١- تحديد ماهية الموائع المنتجة وتحديد النسب الحجمية لها.

٢- قياس درجة حرارة وضغط المكمن.

٣- تحديد الصفات الخزنية والارتشاحية للمكمن.

٤- الحصول على العينات المناسبة لإجراء تحاليل إلى (PVT).

٥- تحديد ماهية هندسة المكمن.

٦- تحديد الاتصال الهيدروديناميكي بين الآبار.

٧- تحديد تصريف الآبار.

٨- تحديد مدى تضرر الآبار.

٩- تحديد كفاءة إكمال الآبار.

١٠- تحديد أعمال التحسين ومدى كفاءتها.

فمهما كان الهدف من اختبار البئر، تعتبر البيانات التي نحصل عليها من الاختبار أساسية لتحليل وتحسين أدائية المكمن وللتنبؤ الموثوق به بتصريف المكمن، والتي تعتبر بدورها ضرورية لتطوير وإدارة المكمن بشكل أفضل. وفيما يلي طرق اختبار تصريف البئر الغازي:

٣-٢- اختبار بئر الغاز الطبيعي حسب نظرية الحالة المستقرة: (Steady- Method) State

يتم اختبار تصريف البئر الغازي عند ثلاثة معدلات متتالية للتدفق على الأقل، وذلك

بقياس معدلات التدفق وضغوط قاع البئر وذلك من خلال:

١- اختبار معدلات الجريان المتعاقبة .

٢- اختبار الفترات الزمنية المتساوية .

٣- اختبار الفترات الزمنية المتساوية (الاختبار المعدل)

تعتمد هذه الاختبارات على معادلة الجريان للحالة المستقرة الزائفة، المعادلة (2.26)

والتي يمكن كتابتها على الشكل التالي:

$$\bar{P}_R^2 - P_{wf}^2 = B.q_{sc} + F.q_{sc}^2 \quad (3.1)$$

$$B = \frac{1422T.\bar{\mu}_g.\bar{Z}}{K_g.h} \left[\ln\left(\frac{0.472r_e}{r_w}\right) + S \right] \quad (3.2) \quad \text{حيث أن:}$$

$$F = \frac{1422T.\bar{\mu}_g.\bar{Z}}{K_g.h} D \quad (3.3)$$

يعبر معامل الجريان اللادارسي (F) في معادلات الجريان عن تسارع وتباطؤ جزيئات المائع عند الارتشاح خلال الوسط المسامي مسببة قوى العطالة التي تحد من حركة جزيئاته، والذي يشير إليه المعاملين التاليين:

١- معامل السرعة (β): (*Velocity Coefficient*) ويعطى بالعلاقة التجريبية التالية:

$$\beta = \frac{2.3 \times 10^{10}}{K_g^{1.2}} \quad (3.4)$$

٢- معامل الاضطراب (D): (*Turbulence Coefficient*) ويعطى بالعلاقة التالية:

$$D = \frac{2.22 \times 10^{-15} \gamma_g . K_g}{\mu_g . h . r_w} \beta \quad (3.5)$$

وبتعويض العلاقة (3.4) في العلاقة (3.5) نحصل على:

$$D = \frac{5.18 \times 10^{-5} \gamma_g}{\mu_g . h . r_w . K_g^{0.2}} \quad (3.6)$$

تختلف نفوذية المنطقة المجاورة للبئر عنها في عمق المكمن، و يمكن أن تكون بسبب تلوث الطبقة نتيجة لدخول سائل الحفر، مما يشكل منطقة ذات نفوذية ضعيفة حول جدران البئر، الأمر الذي يتطلب تطبيق فرق ضغط إضافي لإعطاء معدل تدفق معين، وكون أن امتداد هذه المنطقة الملوثة صغير جداً نسبياً حول جدران البئر فيعبر عنه بمعامل الظاهرة السطحية (*Skin Effect*) ويكون في هذه الحالة ذو قيمة موجبة، وبالمقابل عند إجراء معالجة جيدة وناجحة للبئر ستصبح المنطقة حول جدران البئر ذات نفوذية عالية، أعلى منها في عمق المكمن مما يتطلب فرق ضغط أقل لإعطاء معدل تدفق معين، وبأخذ في هذه الحالة قيمة سالبة.

تم التوصل تجريبياً إلى شكل آخر للمعادلة (3.1) كنتاج لتحليل اختبار حوالي (600) بئر

من قبل (*Shelhardt And Rawlins*) وهي التالية:

$$q_{sc} = C(\bar{P}_R^2 - P_{wf}^2)^n \quad (3.7)$$

والتي تمثل معادلة التصريف المستقر لبئر الغاز الطبيعي، وتعتبر كتقريب تجريبي مقبول. لقد اعتقد سابقاً أن كل من (n) و (C) هي ثوابت وبتحديد لها لمرة واحدة من تحليل اختبار بئر الغاز يمكن استعمالها للتنبؤ بتصريف البئر على المدى الطويل، وذلك بمجرد معرفة القيمة الحالية لمتوسط ضغط المكمن (\bar{P}_R) ، لكن استخدام هذا الاعتقاد سيؤدي إلى حدوث خطأ.

لقد بين *(Karter And all)* أن (n) تتغير ضمن مجال يتراوح بين $[0.5-1.0]$ ، وذلك اعتماداً على قيمة المركبة اللادارسي (Fq_{sc}^2) المعرفة في المعادلة (3.1)، ففي الآبار التي يكون فيها الاضطراب ظاهراً تقترب قيمة (n) من (0.5) ، وفي الآبار التي يهمل فيها الاضطراب تقترب قيمتها من الواحد، وان قيمة المعامل (C) تتناقص بمرور الزمن. يتم رسم المنحني البياني الذي يمثل $\Delta(P^2) = (\bar{P}_R^2 - P_{wf}^2)$ مقابل (q_{sc}) بإحداثيات لوغاريتمية، ويسمى المنحني الناتج بمنحني التصريف المستقر (*Stabilized Deliverability Curve*) والذي سيكون على شكل خط مستقيم بميل قيمته $(1/n)$ وبعد معرفة قيمة (n) يتم حساب قيمة معامل التصريف (C) عند أية نقطة من المنحني في المعادلة (3.7) كما يلي:

$$C = \frac{q_{sc}}{(\bar{P}_R^2 - P_{wf}^2)^n} \quad (3.8)$$

وبعد تعيين قيمة معامل التصريف (C) والأس (n) ، يمكن حساب معدل الجريان المقابل لأية قيمة من قيم (P_{wf}) ، وهناك حد شائع للمقارنة بين آبار الغاز وهو ما يسمى بأقصى معدل للجريان المفتوح (*Absolute Open Flow Potential (AOF)*) وهو معدل الجريان الذي يتواجد إذا ما وصلت قيمة ضغط قاع البئر الجرياني إلى القيمة (14.73) ويعطى بالمعادلة التالية:

$$AOF = C(\bar{P}_R^2)^n \quad (3.9)$$

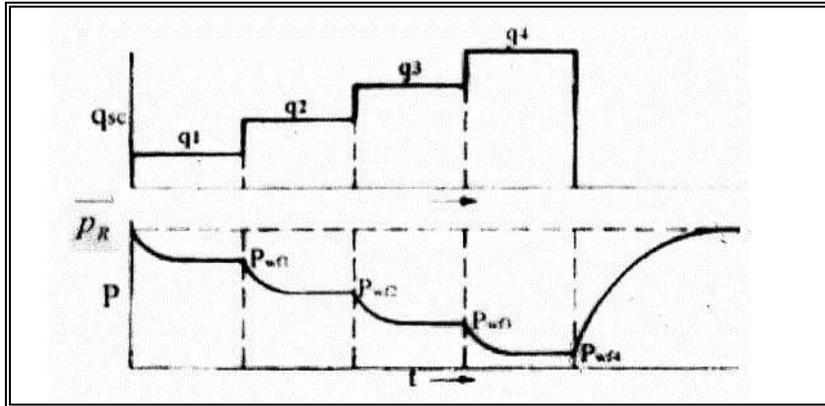
حيث يكون معدل الإنتاج المسموح به أو الإنتاجية المثالية مساوية لـ $(1/3 * AOF)$. يمكننا أيضاً تمثيل المعادلة (3.1) بيانياً برسم $\frac{\Delta(P^2)}{q_{sc}}$ مقابل (q_{sc}) على ورق بياني بإحداثيات ديكارتية وستكون هذه العلاقة خطية، وسيأخذ المنحني شكلاً مستقيماً يتقاطع مع

محور العينات بنقطة تبعد عن مبدأ الإحداثيات مسافة مساوية لقيمة معامل جريان دارسي (B)، وميله بزواوية (α) عن محور السينات يساوي قيمة معامل التصريف اللادارسي (F)، أي أن $F = tg(\alpha)$ وبعد ذلك يمكن معرفة الخواص الخزنية للطبقة باستخدام المعادلات (3.2) و (3.3)

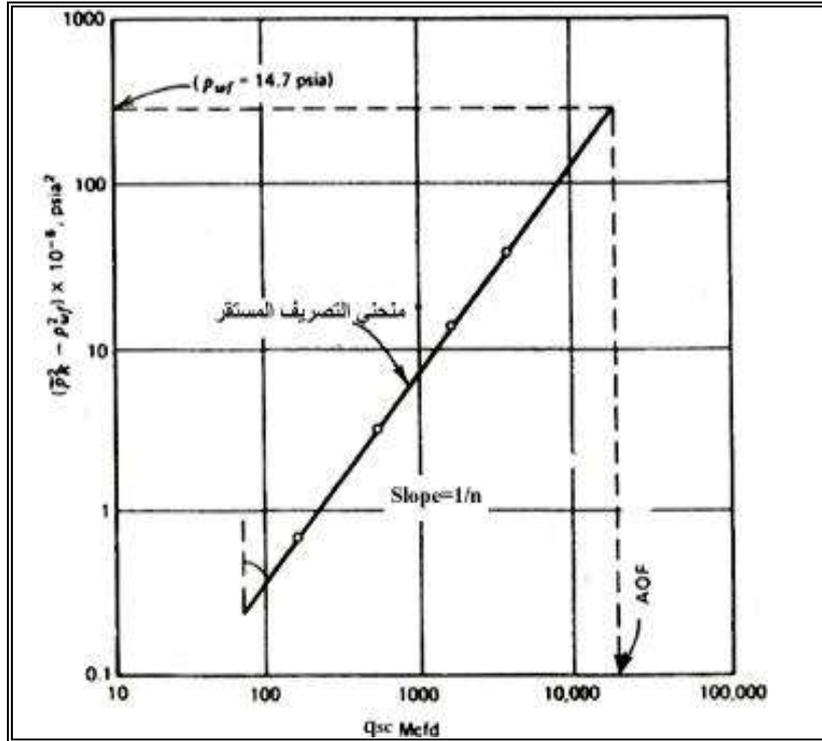
٣-٢-١ - اختبار معدلات الجريان المتعاقبة: (Flow-After-Flow Testing)

يبدأ اختبار معدلات الجريان المتعاقبة من حالة الإغلاق، ثم بفتح البئر للإنتاج بمعدل معين حتى الوصول إلى حالة الاستقرار لكلاً من معدل الجريان (q_{sc}) و ضغط قاع البئر الجرياني (P_{wf})، ويعتبر البئر مستقراً عندما تتساوى قراءتين متتاليتين للضغط خلال زمن قدره (15) دقيقة ويفرق لا يتجاوز ($0.1 Psia$)، وعند الوصول إلى حالة الاستقرار يتم قياس كلاً من (q_{sc}) و (P_{wf}) والتي بعدها يتعاقب تغيير المعدل زيادةً أو نقصاناً، وعادةً ما تؤخذ أربع معدلات، ولا تحدث فترات إغلاق بين المعدلات المتعاقبة، الشكل (3.1)، وتختار أزمنة التدفق بشكل عشوائي أو يتم تنظيمها من قبل القائم بعملية الاختبار، و هذه الطريقة في الاختبار قابلة للتطبيق في التشكيلات ذات النفوذية العالية، والتي لا تحتاج إلى زمنٍ طويلٍ للوصول إلى حالة الاستقرار.

الشكل (3.2) يمثل رسماً نموذجياً لبيانات اختبار معدلات الجريان المتعاقبة.



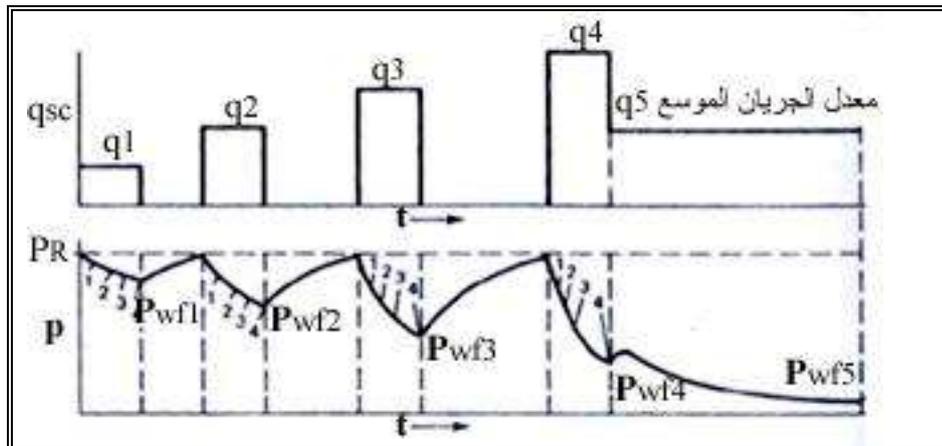
الشكل (3.1) تغيرات معدل الجريان والضغط مع الزمن لاختبار معدلات الجريان المتعاقبة



الشكل (3.2) يمثل قيم $\Delta(P^2)$ مقابل (q_{sc}) لاختبار معدلات الجريان المتعاقبة

٣-٢-٢ - اختبار الفترات الزمنية المتساوية: (Isochronal Testing)

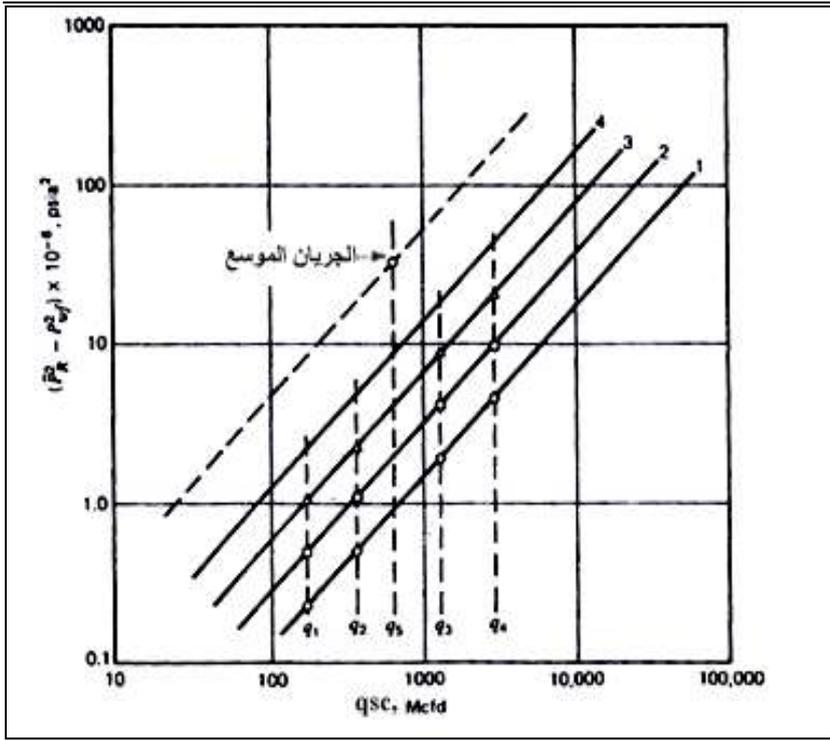
يستند هذا الاختبار إلى النظرية التي تنص على أنه خلال الفترات الزمنية المتساوية للجريان، يتأثر ذات الحجم من الممكن بغض النظر عن قيمة معدل الجريان. وقد تم اقتراح هذا الاختبار كوسيلة لتحديد التصريف في الآبار القليلة الإنتاجية التي تتطلب فترة طويلة من الزمن للوصول إلى حالة الاستقرار، لكن يجب أن تتوفر لدينا نقطة واحدة على الأقل لحالة الجريان المستقر لكي يصبح بالإمكان تحديد معامل التصريف (C).



الشكل (3.3) تغيرات معدل الجريان والضغط مع الزمن لاختبار الفترات الزمنية المتساوية.

يتضمن الأسلوب المتبع في إجراء اختبار الفترات الزمنية المتساوية ما يلي:

- ١- البدء عند حالة إغلاق البئر ثم فتح البئر على فالة ذات فتحة معينة و قياس كل من (q_{sc}) و (P_{wf}) عند فترات زمنية مختلفة لفتحة الفالة هذه.
 - ٢- إغلاق البئر حتى ثبات الضغط عند قيمة الضغط الوسطي للمكمن (\bar{P}_R).
 - ٣- فتح البئر على فالة ذات فتحة أكبر و قياس كل من (q_{sc}) و (P_{wf}) عند ذات الفترات الزمنية في الخطوة (١) .
 - ٤- إغلاق البئر حتى ثبات الضغط عند (\bar{P}_R).
 - ٥- تكرار الطريقة لعدة فالات (عادة أربعة).
 - ٦- يستمر البئر بالتصريف عند أخر فالة حتى الوصول إلى حالة الاستقرار، والذي قد يتطلب عدة ساعات أو حتى أياماً.
- يوضح الشكل (2.3) تغيرات معدل الجريان و الضغط مع الزمن لدى زيادة معدلات الجريان. وقد يستخدم الترتيب العكسي أيضاً أي باتجاه تخفيض معدلات الجريان.
- الخطوة التالية هي رسم أربعة منحنيات منفصلة، واحد لكل فترة جريان ولكل فالة تم عندها أخذ البيانات من خلال رسم ($\bar{P}_R^2 - P_{wf}^2$) مقابل (q_{sc}) بإحداثيات لوغاريتمية، والتي منها سنحصل على أربعة خطوط مستقيمة، خطأ واحداً لكل فترة جريان، يسمح قياس ميل أيّاً من هذه الخطوط المتوازية بتحديد قيمة الأس (n)، ويتم تحديد قيمة معامل التصريف (C) باستخدام معدل الجريان المستقر (الموسع *Extended*) وذلك برسم خط مستقيم على ذات المخطط البياني يمر من النقطة المستقرة ويوازي الخطوط السابقة الذكر، الشكل (3.4).

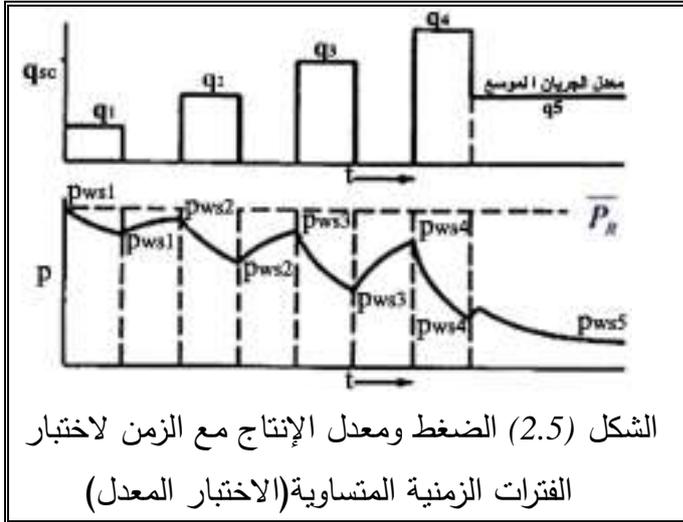


الشكل (3.4) يمثل قيم $\Delta(P^2)$ مقابل (q_{sc}) لاختبار الفترات الزمنية المتساوية

٣-٢-٣ - اختبار الفترات الزمنية المتساوية (الاختبار المعدل) : (Modified Isochronal Testing)

أدخل هذا الأسلوب في الاختبار لتقليل الزمن الذي يحتاجه كل من اختبار الفترات

الزمنية المتساوية و اختبار معدلات الجريان المتعاقبة، التي تمت مناقشتها سابقاً. تشبه طريقة هذا الاختبار طريقة اختبار الفترات الزمنية المتساوية، غير أن فترة الإغلاق عند كل معدل جريان ليست بالمدة الكافية التي تسمح للبئر بالعودة إلى متوسط ضغط المكنن (\bar{P}_R)، و يكون البئر في

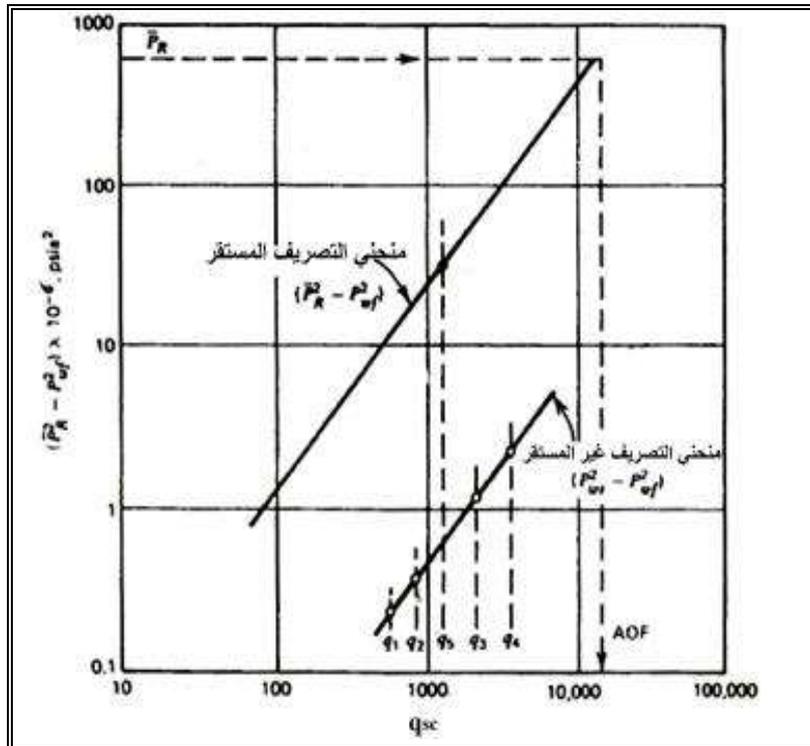


الشكل (2.5) الضغط ومعدل الإنتاج مع الزمن لاختبار الفترات الزمنية المتساوية (الاختبار المعدل)

وضع الإغلاق لذات الفترة الزمنية التي سمح له بالجريان لكل فالة.

بعبارة أخرى، إن فترات الجريان و فترات الإغلاق جميعها متساوية، ونستعوض بالحساب عن (\bar{P}_R) متوسط ضغط المكمن بضغط الإغلاق عند بداية كل فترة تدفق (P_{ws}) ، أي عند نهاية فترة الإغلاق وبدء التدفق، حيث يتم رسم $(P_{ws}^2 - P_{wf}^2)$ مقابل (q_{sc}) بإحداثيات لوغاريتمية، الشكل (2.5). ولتحديد قيمة معامل التصريف (C) لا بد من فترة تدفق مستقرة (موسعة *Extended*)، وذلك لمعرفة قيمة $(\bar{P}_R^2 - P_{wf}^2)$ مقابل (q_{sc}) لهذه النقطة، حيث تمثل على ذات المخطط البياني، ثم يرسم خطأً مستقيماً يوازي المنحنى المرسوم السابق نكره ماراً من هذه النقطة والذي يمثل منحنى التصريف المستقر، الشكل (2.6)، يتم تحديد قيمة (n) من أي منحنى من المنحنيين المذكورين، أما قيمة (C) فيتم تحديدها بأخذ نقطة على المنحنى المستقر و تحسب باستعمال المعادلة (3.8).

يجب عدم عمل هذه الاختبارات في الآبار الشقية والشقية المسامية على فالات كبيرة الأمر الذي سيؤدي إلى انخفاض كبير بالضغط مما قد يؤدي إلى إغلاق الشقوق وبالتالي انخفاض إنتاجية البئر.



الشكل (3.6) يمثل قيم $\Delta(P^2)$ مقابل (q_{sc}) الاختبار المعدل

٣-٢-٤ - زمن الاستقرار: (The Stabilization Time)

تحتاج كافة طرق الاختبار المذكورة سابقا للتنبؤ بتصريف البئر الغازي أو لأدائية التدفق إلى اختبار واحد على الأقل يستمر لفترة كافية من الزمن للوصول إلى الاستقرار، ويمكن حساب الزمن اللازم للوصول إلى الاستقرار بشكل تقريبي من المعادلة التالية:

$$t_s = \frac{380\phi.\bar{\mu}_g.\bar{C}_t.A}{K_g} \quad (3.10)$$

حيث أن: $\bar{C}_t, \bar{\mu}_g$: مقدرة عند القيمة الوسطية للضغط في منطقة التصريف أي عند $(\bar{P}_R + P_{wf})/2$. أما بالنسبة لبئر يقع في مركز مكن ذو شكل اسطواني يحسب من العلاقة التالية:.

$$t_s \approx 1000 \frac{\phi.s_g.\mu_g.r_e^2}{K_g.P_R} \quad (3.11)$$

ويمكن أن يكون هذا الزمن كبيرا في المكامن ذات النفوذية الضعيفة، وبشكل خاص إذا كان هذا البئر يصرف من مساحة كبيرة، توجد طريقة قدمها كل من (Brar And Aziz) للحصول على معادلة التصريف دون إجراء اختبار الاستقرار بالطريقة التالية: يعبر عن معادلة الحالة المستقرة الزائفة لجريان الغاز كما يلي:

$$\Delta(P^2) = 2m \left[\log\left(\frac{0.472r_e}{r_w}\right) + \frac{S}{2.303} \right] q_{sc} + 0.869mDq_{sc}^2 \quad (3.12)$$

$$m = \frac{1637\bar{\mu}_g.\bar{Z}}{K_g.h} \quad (3.13) \quad \text{حيث أن:}$$

وللجريان الانتقالي (Transient Flow) هي:

$$\Delta(P^2) = m \left[\log\left(\frac{K_g.t}{\phi.\mu_g.C_t.r_w^2}\right) - 3.23 + 0.869S \right] q_{sc} + 0.869mD.q_{sc}^2 \quad (3.14)$$

بمقارنة كل من المعادلتين (2.14) و(2.12) مع المعادلة (1.69) نحصل على:

$$B = 2m \left[\log\left(\frac{0.472r_e}{r_w}\right) + \frac{S}{2.303} \right] \quad (3.15)$$

$$B_t = m \left[\log\left(\frac{K_g.t}{\phi.\mu_g.C_t.r_w^2}\right) - 3.23 + 0.869S \right] \quad (3.16)$$

$$F = 0.869mD \quad (3.17)$$

الهدف من هذه الطريقة هو تحديد كل من (B) و (F) للجريان المستقر، وبعد ذلك يمكن استخدام المعادلة (2.26) لحساب أدائية التدفق، ولتحديد كل من معامل الظاهرة

السطحية (S) ومعامل الاضطراب (D) والنفوذية (K)، حيث تكتب المعادلة (3.14) بالشكل التالي:

$$\Delta(P^2)/q_{sc} = B_t + Fq_{sc} \quad (3.18)$$

حيث أن: (B_t) و (F) تم تعريفها في المعادلتين (3.16) و (3.17) على الترتيب، إن قيمة (B_t) ستزداد مع الزمن حتى الوصول إلى الجريان المستقر. تحدد قيم (B_t) و (F) بإحدى الطريقتين التاليتين:

١- الطريقة الأولى: من رسم $(\Delta(P^2)/q_{sc})$ مقابل (q_{sc}) بإحداثيات ديكارتية سنحصل على خطوط مستقيمة متوازية متتالية بميل ثابت عن محور السينات مساوياً (F) و تتقاطع مع محور العينات بقيم مساوية لقيم (B_t) لكل فترة جريان. وتكتب المعادلة (3.16) بالشكل التالي:

$$B_t = m \left[\log \left(\frac{k_g}{\phi \cdot \mu_g \cdot C_t \cdot r_w^2} \right) - 3.230.89 \times S \right] + m \log(t) \quad (3.19)$$

لذلك فإن رسم (B_t) مقابل (t) بمقياس نصف لوغاريتمي (*Semi-Log*) سيعطي خطأ مستقيماً بميل (m) ويتقاطع عند ($t=1\text{hour}$) يساوي إلى (B_{t1}).

٢- الطريقة الثانية: باستخدام طريقة المربع الأصغر (*Least Square*) من الاختبارات الانتقالية كما يلي:

$$B_t = \frac{\sum \frac{\Delta(P^2)}{q_{sc}} \sum q_{sc}^2 - \sum q_{sc} \sum \Delta(P^2)}{N \sum q_{sc}^2 - (\sum q_{sc})^2} \quad (3.20)$$

$$F = \frac{N \sum \Delta(P^2) - \sum q_{sc} \sum \frac{\Delta(P^2)}{q_{sc}}}{N \sum q_{sc}^2 - (\sum q_{sc})^2} \quad (3.21)$$

حيث أن: $N =$ عدد القياسات .

يتم تحليل اختبار الفترات الزمنية المتساوية بطريقة (*Brar And Aziz*) على النحو التالي:

١- يحدد (B_t) و (F) من الاختبارات الانتقالية لعدة فترات جريان (*Flow Times*) باستخدام إحدى الطريقتين المذكورتين أعلاه .

٢- ترسم (B_t) مقابل (t) بإحداثيات لوغاريتمية لتحديد كل من (m) و (B_{t1}).

٣- باستخدام قيمة (m) تحسب قيمة (K) من المعادلة (3.13) .

- ٤- تحل المعادلة (3.16) لإيجاد قيمة (S) ، باستخدام قيم (m) و (k) و (B_{tl}) .
- ٥- تحسب قيمة (B) للجريان المستقر باستخدام المعادلة (3.15) .
- ٦- باستخدام قيمة (B) من الخطوة (١) تحسب قيمة (D) باستخدام المعادلة (3.17) .
- ٧- تعوض قيم (B) و (F) الناتجة عند الجريان المستقر في المعادلة (3.1) لنحصل على معادلة التصريف المستقر للبئر .

٣-٣-٣- اختبار بئر الغاز الطبيعي حسب نظرية الحالة غير المستقرة: *Method* (Unsteady-State)

يسمى هذا النوع من الاختبارات بالاختبارات الانتقالية (*Transient Testes*)، والتي يمكن الحصول منها على معلومات جيدة عن المكنم الغازي مثل النفوذية (K) ومعامل الظاهرة السطحية (S) ومعامل الاضطراب (D) ومتوسط ضغط المكنم (\bar{P}_R) . وإذا استمر الاختبار حتى الوصول إلى جريان الحالة المستقرة الزائفة فيمكن عندئذ تقدير حجم المكنم، وهذا ما يسمى عادة باختبار حدود المكنم (*Reservoir Limit Test*)

إن أكثر الاختبارات الانتقالية شيوعاً هي:

- ١- اختبار انخفاض الضغط .
- ٢- اختبار استعادة الضغط .

٣-٣-٣-١- اختبار انخفاض الضغط: *(Pressure Drawdown Test)*

يعتمد مبدأ هذا الاختبار على السماح للبئر بالإنتاج بمعدل ثابت بعد أن كان مغلقاً وقياس ضغط قاع البئر الجرياني كتابع للزمن، الشكل (2.7-a)، وبعدها يتم رسم (p_{wf}^2) مقابل $Log(t)$ ، والذي سيعطي خطاً مستقيماً بميل يساوي (m) ، الشكل (2-7-b) حيث أن:

$$m = \frac{1637 q_{sc} T \cdot \bar{\mu}_g \cdot \bar{Z}}{k_g \cdot h} \quad (3.22)$$

بعد معرفة قيمة الميل (m) يتم حساب النفوذية (k_g) وسعة الجريان $(k_g \cdot h)$ من المعادلة (2.22)، أما قيمة معامل الظاهرة السطحية الكلي (S') فيتم حسابها من المعادلة التالية:

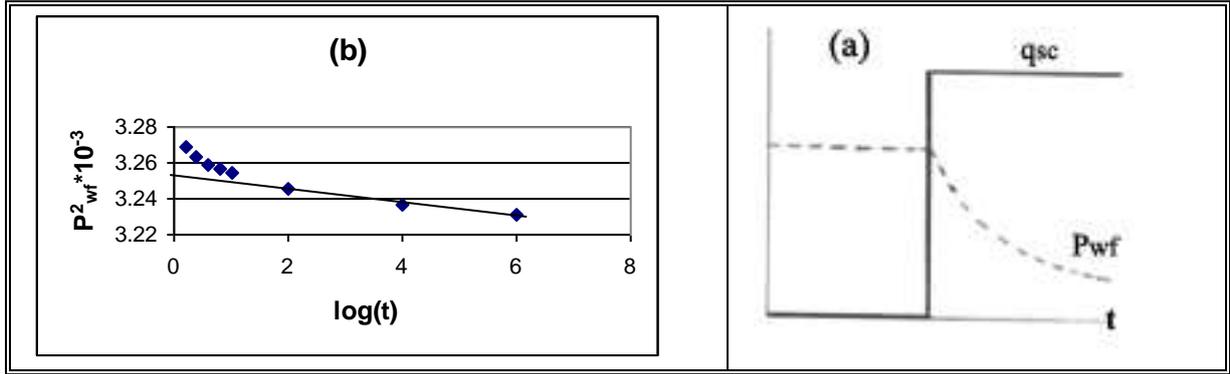
$$S' = 1.151 \left[\frac{P_i^2 - P_{1hr}^2}{m} - \log \frac{k_g}{\phi \cdot \mu_g \cdot C_i \cdot r_w^2} + 3.23 \right] \quad (3.23)$$

نحصل على قيمة P_{1hr} من تقاطع الخط المستقيم مع محور الضغط، و بعد معرفة قيمة (S') يتم حساب كل من (S) و (D) إما بإجراء اختبارين لانخفاض الضغط عند قيمتين مختلفتين لمعدل الجريان ، وبعدها يحسبان من المعادلتين التاليتين:

$$S'_1 = S + Dq_{sc1} \quad (3.24)$$

$$S'_2 = S + Dq_{sc2} \quad (3.25)$$

أومن الاختبار الأساسي بمفرده حيث تحسب قيمة (D) من المعادلة (3.6)، وتحسب قيمة (S) من المعادلة (3.24) .



الشكل (3.7) - (a) مخطط ضغط قاع لبئر ومعدل الجريان لاختبار انخفاض الضغط

(b) - يمثل P_{wf}^2 مقابل $\log(t)$

٣-٣-٢ - اختبار استعادة الضغط : (Pressure Buildup Test)

يعتبر هذا الاختبار من أبسط الاختبارات التي يمكن إجراؤها على البئر الغازي، و يتم جعل البئر ينتج بمعدل ثابت (q_{sc}) لفترة من الزمن، ثم إغلاق البئر في اللحظة $(\Delta t = 0)$ و قياس الزيادة في ضغط قاع البئر بالعلاقة مع زمن الإغلاق (Δt) ، الشكل (3.8-a)، و يجب أن تكون استعادة الضغط في بئر الغاز مصحوبة بفترتي تدفق منفصلتين الأولى قبل استعادة الضغط والثانية بعده.

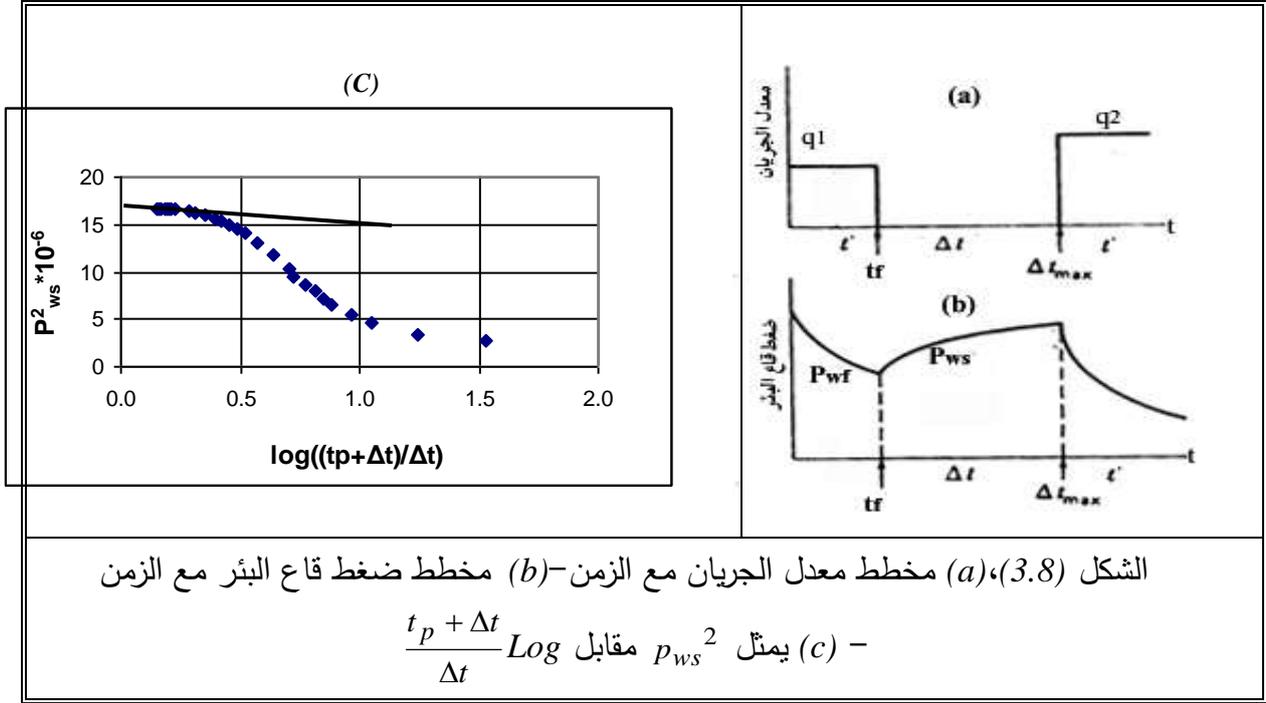
ابتكر هذا الاختبار من قبل هورنر (Horner) و تعتبر طريقة تحليله هي الأفضل، حيث نحصل على منحنى هورنر بتمثيل (p_{ws}^2) مقابل $(\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t})$ بإحداثيات نصف لوغاريتمية و الذي سيعطي خطأ مستقيماً بميل يساوي (m) ، الشكل (3-8-c).

$$P_{ws}^2 = P_i^2 - m \cdot \log \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \quad (3.26) \quad \text{معادلة هذا الخط هي:}$$

$$m = \frac{1637 q_{sc} \cdot T \cdot \bar{\mu}_g \cdot \bar{Z}}{K_g \cdot h} \quad (3.27) \quad \text{ميله يساوي}$$

$$K_g.h = \frac{1637q_{sc}.T.\bar{\mu}_g.\bar{Z}}{m} \quad (3.28)$$

سعة الجريان تساوي



واعتماداً على هذه المعادلات يتم حساب كل من معامل ناقلية الطبقة $(K_g.h/\mu_g)$ والنفوذية (K_g) وسعة الجريان $(K_g.h)$ ، أما معامل الظاهرة السطحية الكلي المقابل للمعدل q_{sc} فيحسب من العلاقة التالية:

$$S' = 1.151 \left[\frac{P_{1hr}^2 - P_{wf}^2}{m} - \log \frac{K_g}{\phi.\mu_g.C_t.r_w^2} + 3.23 \right] \quad (3.29)$$

حيث تقرأ قيمة P_{1hr} من امتداد الخط المستقيم عند الزمن $(\Delta t = 1)$ ، (P_{wf}) هو ضغط جريان قعر البئر عند الإغلاق $(\Delta t = 0)$ و تكون النفوذية في هذه المعادلة بواحدات (md) .

لتعيين قيمة متوسط ضغط المكنن (\bar{P}_R) نمدد الخط المذكور سابقاً حتى يقطع محور الضغط، و هذه القيمة يمكن اعتبارها بتقريب مقبول مساوية لمربع متوسط ضغط المكنن.

لتحديد معامل الاضطراب (D) نحسب معامل الظاهرة السطحية الكلي (S') عند فترتي

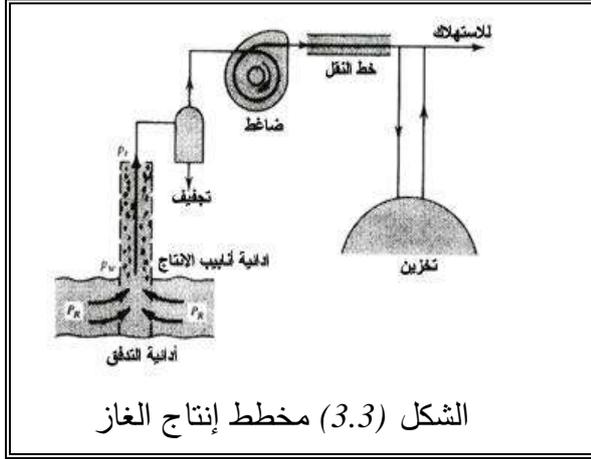
$$S'_1 = S + Dq_{sc1} \quad (3.30) \quad \text{التدفق قبل وبعد استعادة الضغط أي:}$$

$$S'_2 = S + Dq_{sc2} \quad (3.31)$$

والتي منها نحسب قيمة معامل الظاهرة السطحية (S) و معامل الاضطراب (D) أو يحسب (D) من المعادلة (3.6) . كما يمكن حساب القيمة الصحيحة لمعامل اللادارسي (F) من المعادلة (3.3) و ذلك بعد معرفة قيمة (D).

٣-٤- التصريف: ($Deliverability$)

الشكل (3.3) يبين تمثيل بياني بسيط لتدفق الغاز الحقيقي من المكمن، يتدفق الغاز



الشكل (3.3) مخطط إنتاج الغاز

من المكمن عبر الطبقة إلى البئر وتسمى هذه المرحلة أدائية تدفق بئر الغاز ثم يتدفق الغاز صعوداً عبر مواسير الإنتاج إلى السطح وتسمى هذه المرحلة أدائية مواسير الإنتاج وخلال هذه المرحلة يجب اخذ عاملين بعين الاعتبار هما:

١- ضياع الضغط نتيجة الاحتكاك الذي يحدث في مواسير الإنتاج وبالتالي انخفاض الضغط.

٢- كمية المياه المعلقة الموجودة، وذلك حتى في البئر التي لا تنتج ماء هناك تراكمًا للمياه في مواسير إنتاج البئر و التي ستنتمى مع الزمن وذلك تبعاً لمعدل الإنتاج مما سيؤدي إلى زيادة كثافة الغاز وبالتالي زيادة تأثير الضغط الهيدروستاتيكي المباشر على الطبقة وهذه الظاهرة ستؤدي إلى تجميع السائل في قعر البئر.

٣-٤-١- تصريف المكمن : ($Reservoir Deliverability$)

إذا فرضنا أن قيمة الأس (n) في معادلة التصريف ثابتاً، المعادلة (3.7)، فإن معامل التصريف (C) يتأثر بتباعد الآبار وفعالية إكمالها. لقد قدم كل من ($Vany, Elanbas$ and $With row$) معطيات للتدفق الشكل (3.4)، بينوا فيها كيف ينخفض تصريف الآبار مع الزمن. يمكن كتابة معادلة تصريف المكمن كما يلي:

$$q_{res} = C_{res} (\bar{P}_R^2 - P_{wf}^2)^n \quad (3.32)$$

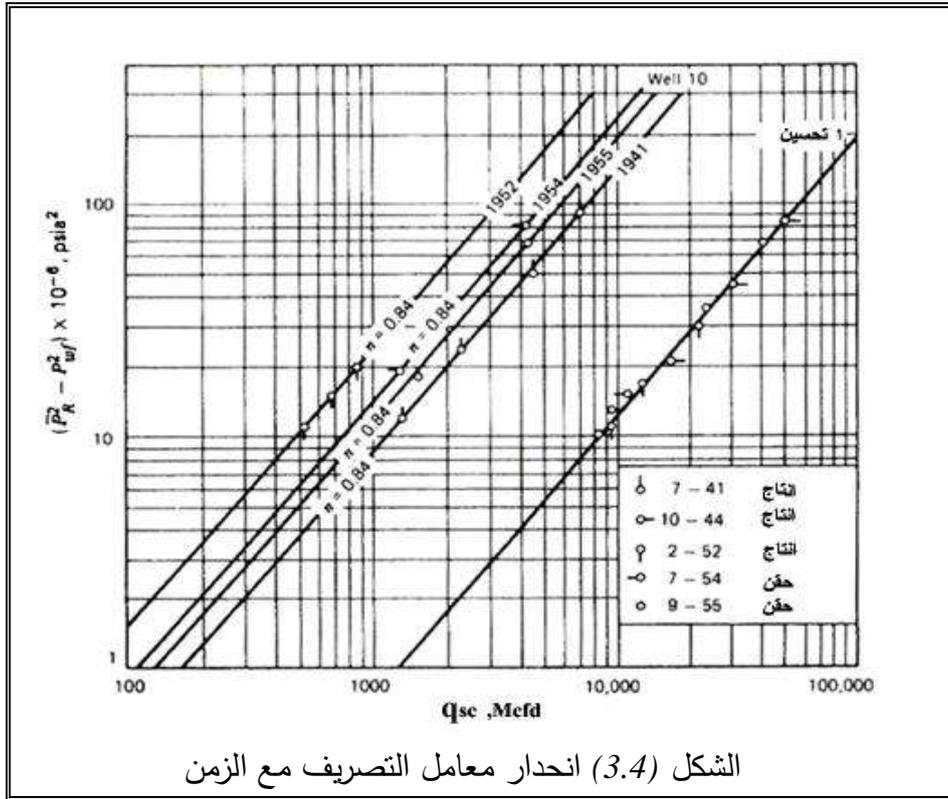
$$C_{res} = \sum_{i=1}^N C_i \quad (3.33) \quad \text{حيث أن :}$$

ويكون متوسط معامل التصريف هو: ($C_{avg} = C_{res} / N$)

وبالتالي تكتب معادلة التصريف الوسطية للمكمن الغازي كما يلي:

$$q_{avg} = C_{avg} (\bar{P}_R^2 - P_{wf}^2)^n \quad (3.34)$$

ولكن كما بينا في الفصل الثاني أن كل من (C) و (n) يمكن أن تتغير بشكل ملحوظ في كافة أنحاء المكمن . ويمكن الحصول على منحنى التصريف الوسطي لعدد من الآبار أو لكامل المكمن وذلك بحساب معدلات الإنتاج الكلية المتعلقة بقيمتين لـ $(\bar{P}_R^2 - P_{wf}^2)$. يتم اختيارها بشكل عشوائي بحيث تكون متباعدة قدر الامكان على منحنى التصريف وتحدد عندئذ قيم كل من (C) و (n) بالاعتماد عليها.



٣-٤-٢ - تحديد قدرة تجهيزات البئر: (Equipment Capacity Limitations of Well)

لا يرتبط تصريف بئر الغاز الطبيعي فقط بقدرة المكمن على الإنتاج كون الإنتاج يجب أن يمر أيضاً عبر مواسير الإنتاج، الفواصل، نازعات الرطوبة، مقاييس الغزارة، خطوط النقل إلى الخط الرئيسي حيث سيحدث بعض الانخفاض في الضغط، بل يرتبط بكل من هذه الأجهزة على حدى وهذا الانخفاض في الضغط تابع لمعدل الجريان.

٣-٤-٢-١ - قدرة مواسير التغليف أو الإنتاج: (Tubing Or Casing Capacity)

اشتق $(R.V.Smith)$ المعادلة التالية للجريان العمودي للغاز في مواسير الإنتاج:

$$q_{sc} = 200000 \left[\frac{d^5 (P_{wf}^2 - e^s P_{lf}^2) s}{\gamma_g T Z f H (e^5 - 1)} \right]^{0.5} \quad (3.35)$$

حيث أن (\bar{Z}) هو متوسط عامل انضغاط الغاز عند متوسط درجة الحرارة والضغط الحسابيين.

وهنا مطلوب استخدام أسلوب التجربة والخطأ للحصول على (P_{wf}) من المعادلة (4.4) .
٣-٤-٢-٢- قدرة خط الجريان: (Flow-Line Capacity)

معادلة (Weymouth) للجريان الأفقي هي:

$$q_{sc} = \frac{433.49 T_{sc}}{P_{sc}} \left[\frac{(P_1^2 - P_2^2) . d^{16/3}}{\gamma_g . T . L . \bar{Z}} \right]^{0.5} \quad (3.36)$$

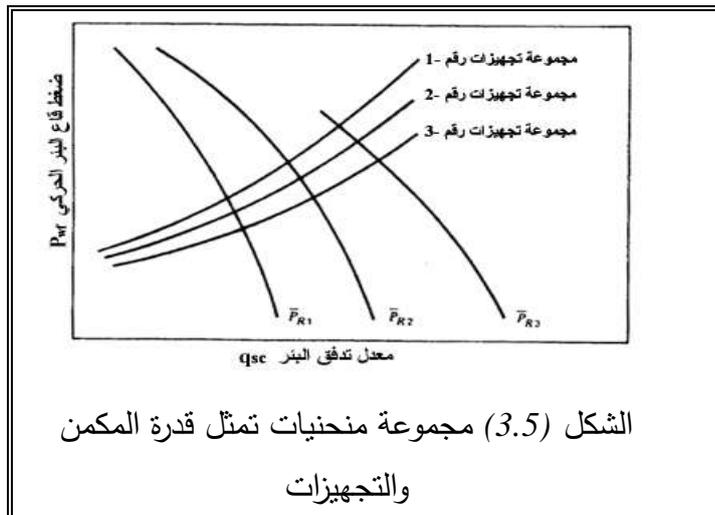
حيث أن (\bar{Z}) هو متوسط عامل انضغاط الغاز بين الضغطين (P_1) و (P_2) ودرجة الحرارة (T) .
 بما أن المعادلة (3.36) ستستعمل لحساب الضغط (P_1) المقابل لقيمة معينة لمعدل التدفق وبما أن (\bar{Z}) ترتبط بقيمة (P_1) لهذا فان الحل سيكون بطريقة التجربة والخطأ، وعادة يلزم محاولتين على الأقل للحصول على قيمة (P_1) بدقة مقبولة.

٣-٤-٢-٣- قدرة خط الإنتاج: (Pipeline Capacity)

هبوط الضغط على طول خط الإنتاج يعطى بمعادلة (Panhandle) التالية:

$$q_{sc} = 435.87 E \left(\frac{T_{sc}}{P_{sc}} \right)^{1.07881} \left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{T . L . \bar{Z}} \right)^{0.5394} \left(\frac{1}{\gamma_g} \right)^{0.4606} d^{2.6182} \quad (3.37)$$

٣-٤-٣- توقع أدائية المكنن : (Predicting Reservoir Performance)



الشكل (3.5) مجموعة منحنيات تمثل قدرة المكنن والتجهيزات

لتوقع عمر إنتاج المكنن بشكل صحيح من الضروري الأخذ بعين الاعتبار قدرة المكنن على الإنتاج وقدرة الأجهزة وحالة استنزاف المكنن كما هو متوقع من توازن المادة، يوضح الشكل (3.5) مجموعة من منحنيات الطاقة. يجب الأخذ بعين الاعتبار منحنى طاقة مجموعة

الإنتاج ومنحنيات التصريف من اجل استنتاج كيف سيعمل المكنن عند أي مجموعة من

الشروط المعطاة. فعلى سبيل المثال نفترض أننا نريد معرفة عدد الآبار المطلوب حفرها في مكن مستقل لتحقيق معدل جريان ما، تم التعاقد عليه خلال فترة زمنية محددة، وهنا يجب أن نكون متأكدين بان عدد الآبار المحفورة كافية لإنتاج المعدل المطلوب.

كلما ازداد عدد الآبار كلما نقص معدل الإنتاج المطلوب من كل بئر وسوف يحتفظ هذا البئر بطاقة إنتاج لفترة أطول من مدة العقد، وبالنتيجة يجب حل هذه المشكلة بطريق التجربة والخطأ مع ثبات حالة الاستنزاف خلال مدة العقد وثبات المعدل الكلي المنتج من المكن. إذا حددنا عدداً من الآبار فإن أحد هذه الآبار يمكن أن يستعمل كأساس لرسم منحنى التصريف والذي بدوره سيقدر التباعد بين الآبار المحددة باستخدام معادلة (Tek, Grove And Poettmann) كما يلي:

$$C_2 = C_1 \left[\frac{\ln(r_{d1}/r_w)}{\ln(r_{d2}/r_w)} \right]^n \quad (3.38)$$

حيث أن قيمة (C_1, C_2) يتم الحصول عليها من المعادلة (3.8) وكانت:

$$C = \frac{q_{sc}}{(P_R^2 - p_{wf}^2)^n} \quad (3.8)$$

ونصف قطر التصريف لكل بئر يتم الحصول عليه من المعادلة التالية:

$$r_d = 0.0704 \left(\frac{K.t.P_R}{\phi.\mu} \right)^{0.5} \quad (3.39)$$

يتم افتراض قيمة لمعدل الجريان لكل بئر بحيث يحدد العقد معدل الجريان الكلي للمكن. يمكن إيجاد ضغط قاع البئر اللازم ليؤمن المعدل المطلوب من منحنى التصريف، وعندئذ يمكن استعمال هذا الضغط مع منحنيات قدرة الأجهزة وذلك لتحديد ما إذا كانت قدرة التجهيزات يمكن أن تؤمن المعدل المطلوب لكل بئر ولضغط المكن ذاته، فإذا كانت التجهيزات غير قادرة على تأمين هذا المعدل عندئذ سنحتاج لعدد أكبر من الآبار، وبالتالي فإنه يجب تحديد عدد الآبار المثالي بدقة لكي يتأكد المهندس المعني بأنه قد قرر الحل الأفضل اقتصادياً.

يتم تحديد أدائية المكن بالطريقة التالية:

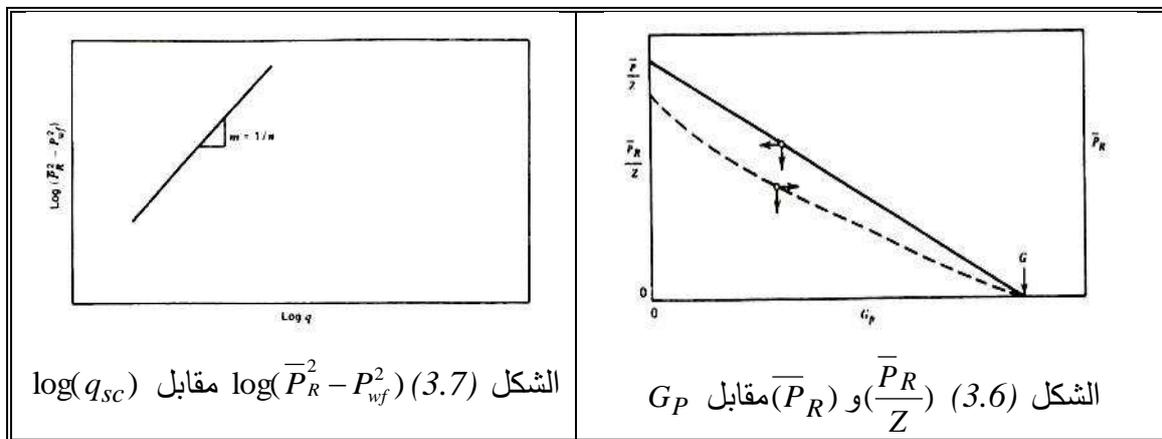
١- يرسم المنحنى الذي يمثل (\bar{P}_R/Z) مقابل (G_p) للحصول على قيمة الاحتياطي من

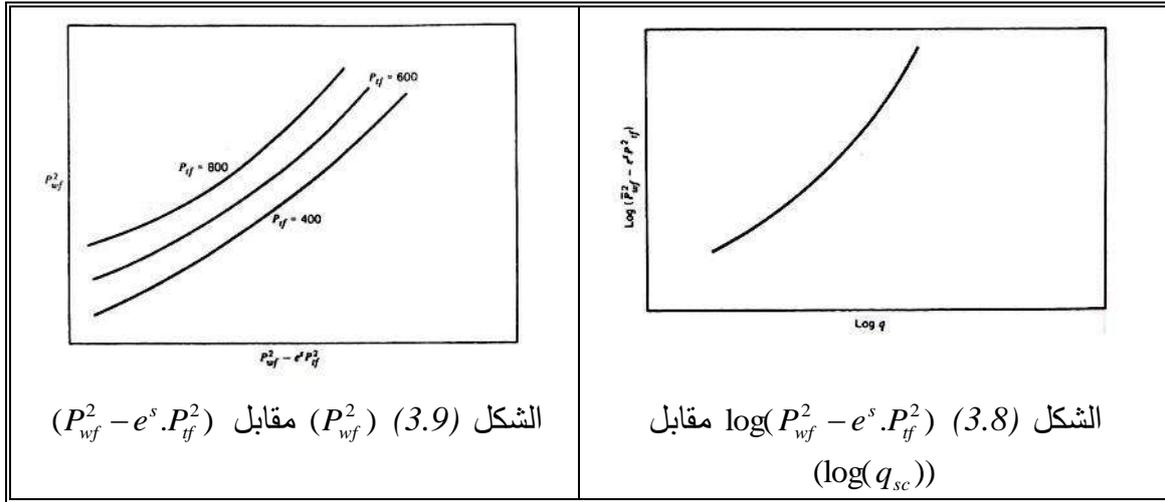
الغاز الموجودة في المكن.

- ٢- يرسم منحنى التصريف لتحديد مؤشرات المعادلة (3.1) أو المعادلة (3.7)، وهنا يجب مراقبة معدلات الإنتاج المستعملة للحصول على منحنيات التصريف من حيث أنها يجب أن تغطي معدلات الإنتاج المرتبطة بالعمر المستقبلي لإنتاج المكن.
- ٣- ترسم منحنيات استعادة الضغط أو منحنيات انخفاض الضغط لتساعد في تحديد قيم كل من $(K.h,S)$ وقيمة (C) في الخطوة رقم (٢).
- ٤- يحدد ضغط الخط اللازم لتأمين ضخ الكمية المتعاقد عليها من الغاز وأي توقعات مستقبلية.

من أجل استنتاج أدائية المكن يجب تحضير المنحنيات التالية:

- ١- المنحنى الذي يمثل (\bar{P}_R/Z) مقابل (G_p) و (\bar{P}_R) مقابل (G_p) ، كما في الشكل (3.6)
- ٢- المنحنى الذي يمثل $\log(\bar{P}_R^2 - P_{wf}^2)$ مقابل $\log(q_{sc})$ ، كما في الشكل (3.7).
- ٣- المنحنى الذي يمثل $\log(P_{wf}^2 - e^s \cdot P_{if}^2)$ مقابل $\log(q_{sc})$ ، كما في الشكل (3.8).
- ٤- المنحنى الذي يمثل (P_{wf}^2) مقابل $(P_{wf}^2 - e^s \cdot P_{if}^2)$ ، كما في الشكل (3.9).





من المنحنيات (3.6) حتى (3.9) يمكن للمهندس أن يحدد الأداء المستقبلي لمكمن الغاز الطبيعي كما يلي:

١- تحدد الإنتاجية التراكمية للغاز (G_p) إلى المرحلة التي سيصبح فيها بئر الغاز غير قادر على تأمين الكمية الاعظمية المتعاقد عليها.

(أ) - من الشكل (3.8) تحدد قيمة $(P_{wf}^2 - e^s . P_{ff}^2)$ المقابلة للقيمة العظمى لـ (q_{sc}) .

(ب) - من الشكل (3.9) تحدد قيمة (P_{wf}^2) المقابلة لقيمة $(P_{wf}^2 - e^s . P_{ff}^2)$ التي تم الحصول عليها في المرحلة (أ).

(ج) - من الشكل (3.7) تحدد قيمة $(\bar{P}_R^2 - P_{wf}^2)$ المقابلة لقيمة (q_{sc}) المستخدمة في المرحلة (أ).

(د) - تحسب قيمة (\bar{P}_R) من المعطيات التي تم الحصول عليها في المراحل (ب) و (ج).

(هـ) - من الشكل (3.6) نحصل على الإنتاجية التراكمية للغاز المقابلة لقيمة (\bar{P}_R) التي

تم الحصول عليها في المرحلة (د).

٢- تحدد الإنتاجية التراكمية في زمن ما يكون فيه البئر غير قادر على إنتاج المعدل المتعاقد عليه كمرحلة (أ) و (هـ) للمعدل الجديد.

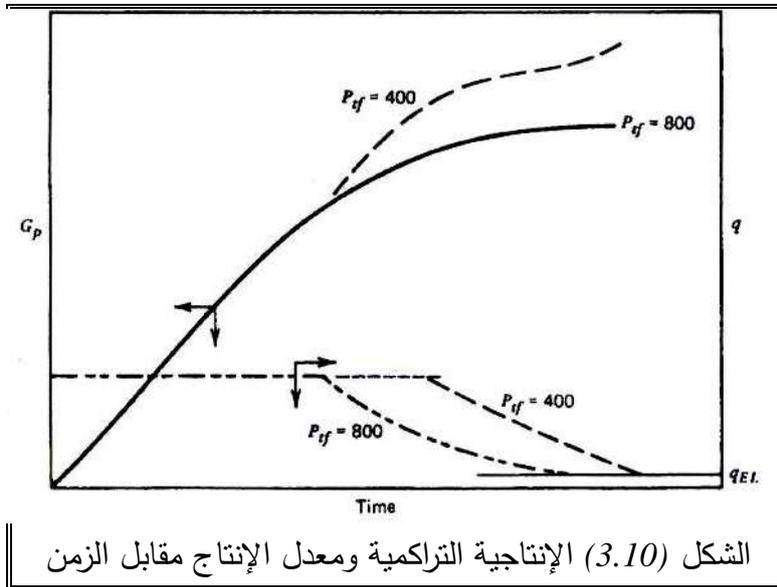
٣- يقسم معدل الإنتاج إلى عشرة أجزاء متساوية محصورة بين معدل الإنتاج الطبيعي المتعاقد عليه وبين معدل الإنتاج عند الحد الاقتصادي، ثم تحسب قيمة (G_p) لكل واحدة من هذه المعدلات

٤- تستخدم الخطوات من (أ) إلى (هـ) لكل واحدة من هذه المعدلات.

٥- يحسب الزمن اللازم لإنتاج الغاز كما يلي:

$$\Delta t_i = 2 \times \frac{G_{pi} - G_{pi-1}}{q_i + q_{i-1}} \quad (3.40)$$

- ٦- يرسم منحنى يمثل الإنتاجية التراكمية ومعدل الإنتاج مقابل الزمن، انظر الشكل (3.10).
٧- تعاد الخطوات من (٢) إلى (٥) من أجل القيم المختلفة لضغط رأس البئر.



٣-٥- التحليل باستخدام الضغط الزائف للغاز الحقيقي: (Real Gas Analysis) (Pseudo Pressure)

عند اشتقاق معادلة جريان الغاز المكمني عند التدفق الشعاعي للغاز الحقيقي بدلالة $\Delta(p^2)$ المعادلة (3.15) استخدم ضمن المراحل التكامل التالي:

$$2 \int_{p^o}^p \frac{PdP}{\mu_g \cdot Z} \quad (3.41)$$

باعتبار أن (μ_g) و (Z) تابعتان للضغط، لذلك يجب شمولها في عملية التكامل، و لتبسيط الدراسات السابقة، وذلك عند اشتقاق معادلات الجريان بدلالة $\Delta(p^2)$ ، تم الافتراض أن (μ_g) و (Z) يمكن اعتبارهما ثابتتين عند درجة حرارة المكمن و متوسط الضغط في منطقة التصريف و الذي سينتج عنه ظهور قيمة متوسطة لكل من (μ_g) و (Z) أي $(\bar{\mu}_g)$ و (\bar{Z}) في كل معادلات الجريان مقدرة عند القيمة الوسطية للضغط في منطقة التصريف أي عند:

$$\left(\frac{P_R + P_{wf}}{2} \right)$$

بالنسبة للمكان ذات الضغط المنخفض المعتدل ($\bar{P}_R \leq 2500 \text{ psia}$) فإن هذا الافتراض يعتبر كافياً، و لكن في المجالات الأخرى للضغط فإن حاصل الجداء $(\frac{1}{\mu_g \cdot Z})$ سوف لن يكون علاقة خطية مع الضغط.

ومن هنا قدمت طريقة أكثر دقة لتحديد تأثيرات (μ_g) و (Z) من قبل *(AL-Hossainy, Ramey And Crawford)*، حيث عزفوا التكامل في المعادلة (3.41) بالضغط الزائف للغاز الحقيقي $m(P)$ أو ما يسمى أيضاً بجهد الغاز الحقيقي والذي يعطى بالمعادلة التالية:

$$2 \int_{P^o}^P \frac{P}{\mu_g \cdot Z} dP \quad m(P) = \quad (3.42)$$

حدود التكامل هي بين الضغط الأساسي (P^o) و الضغط الحالي (P) .
و بالتالي يمكن أن نكتب:

$$m(\bar{P}_R) - m(P_{wf}) = 2 \int_{P^o}^{\bar{P}_R} \frac{PdP}{\mu_g \cdot Z} - 2 \int_{P^o}^{P_{wf}} \frac{PdP}{\mu_g \cdot Z} = 2 \int_{P_{wf}}^{\bar{P}_R} \frac{PdP}{\mu_g \cdot Z} \quad (3.43)$$

إن كافة المؤشرات في تكامل المعادلة (3.43) هي ذاتها تابعة للضغط و يمكن الحصول عليها مباشرة من تحاليل (PVT) للغاز عند درجة حرارة المكنم أو فقط من معرفة الكثافة النسبية للغاز و من العلاقة القياسية المتبادلة مع (μ_g) و (Z) يمكن حسابها أيضاً بدرجة حرارة المكنم.

يمكن تحويل كافة المعادلات التي تم اشتقاقها سابقا من التحليل الخاص بمربع الضغط $\Delta(P^2)$ إلى التحليل باستخدام الضغط الزائف $m(P)$ و ذلك باستبدال مربعات الضغط بحدود الضغط الزائف وحذف حاصل الجداء $(\bar{\mu}_g \cdot \bar{Z})$ من المعادلة، حيث أن $(\bar{\mu}_g \cdot \bar{Z})$ قد تم تضمينها في عبارة الضغط الزائف للغاز الحقيقي المعادلة (3.43) وعلى سبيل المثال المعادلة (3.1) ستصبح ...

$$m(\bar{P}_R) - m(P_{wf}) = Bq_{sc} + Fq_{sc}^2 \quad (3.44)$$

حيث أن المعادلات (3.2) أو (3.3) ستصبح على التوالي: .

$$B = \frac{1422T}{K_g \cdot h} \left[\ln \left(\frac{0.472r_e}{r_w} \right) + S \right] \quad (3.45)$$

$$F = \frac{1422T}{K_g \cdot h} D \quad (3.46)$$

الجدول (3.1) يبين خلاصة المعادلات باستخدام الصيغة $\Delta(P^2)$ وتلك المقابلة لها باستخدام الصيغة $m(p)$ المستعملة .

إن معادلة الانتشارية لحالة الجريان غير المستقر المعادلة (3.14) ستصبح على الشكل التالي:

$$\frac{\partial^2 m(P)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial m(P)}{\partial r} = \frac{\phi \cdot \mu_g \cdot C_t}{K_g} \frac{\partial m(P)}{\partial t} \quad (3.47)$$

نلاحظ أن هذه المعادلة خطية من ناحية $m(p)$ ، باستثناء الحد $(\frac{\phi \cdot \mu_g \cdot C_t}{K_g})$ لا يزال تابعاً للضغط (وبالتالي تابعاً للضغط الزائف)، تبقى هذه المعادلة غير خطية جزئياً، وغالباً من المسموح به التعامل معها كمعادلة خطية، ولكن يمكن تحويلها إلى خطية بإضافة تعريف الزمن الزائف (*Pseudotime*) والذي قدّم من قبل (*Agarwal*)، وطريقة استخدامه شرحت من قبل (*Holditch And Lee*) عام (1982)، حيث عرّف (*Agarwal*) الزمن الزائف كما يلي:

$$t_{pseudo} = \int_0^t \frac{1}{\mu_g \cdot C_t} dt = \int_{p_0}^P \frac{(dt/dp) dp}{\mu_g \cdot C_t} \quad (3.48)$$

نلاحظ من هذه المعادلة أنه لن يكون الزمن هو واحدة قياس الزمن الزائف، لذلك توجد بعض الصعوبة بالتعامل معه عند رسم المنحنيات البيانية ودراستها، كما نلاحظ من المعادلات (3.41) و(3.42) انه إذا كان الحد $(\mu_g \cdot Z)$ ثابت، عندئذ يصبح الضغط الزائف $m(P)$ مشابهاً لمربع الضغط $\Delta(P^2)$ والزمن الزائف (t_{pseudo}) يصبح مشابهاً للزمن الحقيقي (t). نلاحظ أيضاً أن الضغط الزائف ليس له واحدة الضغط، وذلك كما يظهر من المعادلة (3.33).

ولهذا تم إدخال صيغة جديدة للضغط والزمن الزائفين من قبل (*Meunier And Kabir*) ، (*Ramey*) عام (1987)، هذه التوابع الزائفة المعدلة الجديدة لها واحداث الضغط والزمن ذاتها وتعطى بالمعادلات التالية:

$$P_{pn} = P_i + \frac{\mu_{gi} \cdot Z_i}{P_i} \int_{P_i}^P \frac{P}{\mu_g \cdot Z} dp \quad (3.49)$$

$$t_{pn} = \mu_{gi} \cdot C_i \int_0^t \frac{1}{\mu_g \cdot C_{ii}} dt \quad (3.50)$$

لحساب قيم الضغوط الزائفة أو الزائفة المعدلة من مجموعة قراءات الضغط يجب إجراء عملية تكامل عددي للمعادلة (3.41) عند حساب الضغوط الزائفة، وإجراء تكامل عددي للمعادلة (2.46) عند حساب الضغوط الزائفة المعدلة، والذي يمكن القيام به على مراحل، موضحة بالجدول رقم (3.2) عند حساب الضغوط الزائفة وبالجدول رقم (3.3) عند حساب الضغوط الزائفة المعدلة، والذي يمكن القيام به بشكل أفضل باستخدام الحاسوب، حيث أن التكامل العددي للمعادلات (3.49) و(3.50) يستعمل قاعدة شبه المنحرف كما يلي:

$$m(P) = 2 \sum_{i=2}^n \frac{1}{2} \left[\left(\frac{P}{\mu_g \cdot Z} \right)_{i-1} + \left(\frac{P}{\mu_g \cdot Z} \right)_i \right] (P_i - P_{i-1}) \quad (3.45)$$

$$m(P) = 2 \sum_{i=2}^n \left(\frac{\bar{P}}{\mu_g \cdot Z} \right) \Delta P \quad (3.46) \quad \text{أو}$$

يتطلب استخدام أسلوب الضغط الزائف $m(P)$ أو الضغط الزائف المعدل في التحليل إعداد جدول أو مخطط بياني لقيم $m(P)$ أو (P_{pn}) المقابلة لضغط الغاز (P) المطلوب عند درجة حرارة المكمن، وبعدها يتم تمثيل قيم $m(P)$ أو (P_{pn}) مقابل (P) على إحداثيات ديكارتية كما يظهر في الشكلين (3.9) و(3.10) للقيم المبينة في الجدولين (3.2) و(3.3) على الترتيب .

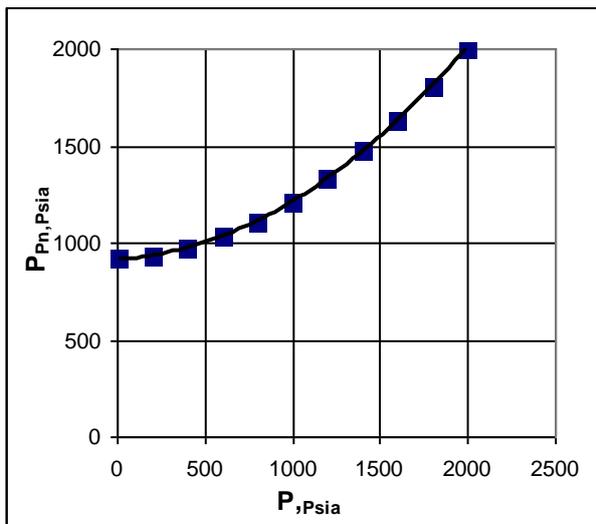
من المفترض أن تكون هذه المنحنيات خطية عند قيم الضغوط الأعلى من (2800 Psia)، والمنحني الناتج يجب الاحتفاظ به من اجل استعماله لطيلة عمر المكمن، حيث يمكن من خلاله التحويل من الضغط الحقيقي إلى الضغط الزائف وبالعكس .

الجدول (3.2) حساب الضغط الزائف للغاز الحقيقي

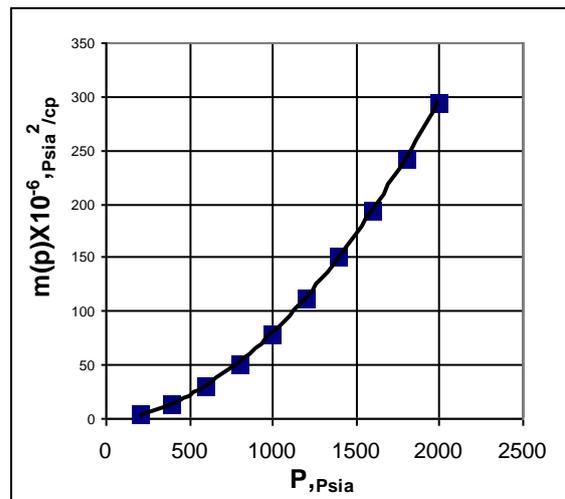
P, Psia	μ, cp	Z	ΔP	$\frac{P}{\mu_g \cdot Z}$	$\frac{\bar{P}}{\mu_g \cdot Z}$	$m(p) = \sum \frac{2\bar{P}}{\mu_g \cdot Z} \Delta P$	$m(p) \times 10^{-6} \text{ Psia}^2 / \text{cp}$
14.7	0.01198	0.9987		1228.642			
200	0.01235	0.9839	185	16459.33	8843.9847	3272274.35	3.27758
400	0.01277	0.9686	200	32338.85	24399.091	9759636.29	13.0372
600	0.01319	0.9544	200	47662.41	40000.634	16000253.4	29.0375
800	0.01362	0.9414	200	62393.4	55027.909	22011163.5	51.0486
1000	0.01405	0.9296	200	76564.52	69478.962	27791584.8	78.8402
1200	0.01451	0.9194	200	89951.69	83258.105	33303242.2	112.143
1400	0.01496	0.9107	200	102759.3	96355.492	38542196.8	150.686
1600	0.01542	0.9038	200	114805.7	108782.47	43512989	194.199
1800	0.01589	0.8986	200	126061.4	120433.54	48173414.5	242.372
2000	0.01636	0.8953	200	136545.7	131303.57	52521429.2	294.893

الجدول (3.3) حساب الضغط الزائف المعدل للغاز الحقيقي

P, Psia	μ, cp	Z	ΔP	$\frac{P}{\mu_g \cdot Z}$	$\frac{\bar{P}}{\mu_g \cdot Z}$	$\frac{\bar{P}}{\mu_g \cdot Z} \Delta P$	$\int_{P_i}^P \frac{P \cdot dP}{\mu_g \cdot Z}$	P_{Pn}, Psia
14.7	0.01198	0.9987	-185	1228.642	8843.985	-1636137.2	-1.47E+08	920.1852
200	0.01235	0.9839	-200	16459.33	24399.09	-4879818.1	-1.46E+08	932.1676
400	0.01277	0.9686	-200	32338.85	40000.63	-8000126.7	-1.41E+08	967.9052
600	0.01319	0.9544	-200	47662.41	55027.91	-11005582	-1.33E+08	1026.495
800	0.01362	0.9414	-200	62393.4	69478.96	-13895792	-1.22E+08	1107.095
1000	0.01405	0.9296	-200	76564.52	83258.11	-16651621	-1.08E+08	1208.861
1200	0.01451	0.9194	-200	89951.69	96355.49	-19271098	-91375015	1330.81
1400	0.01496	0.9107	-200	102759.3	108782.5	-21756495	-72103916	1471.943
1600	0.01542	0.9038	-200	114805.7	120433.5	-24086707	-50347422	1631.278
1800	0.01589	0.8986	-200	126061.4	131303.6	-26260715	-26260715	1807.678
2000	0.01636	0.8953		136545.7				2000



الشكل (3.10) يمثل (P_{Pn}) مقابل (P)



الشكل (3.9) يمثل $m(P)$ مقابل (P)

الجدول (3.4) خلاصة المعادلات باستخدام الصيغة $\Delta(P^2)$ وما يقابلها باستخدام الصيغة $m(p)$

المعادلة	باستخدام الصيغة $\Delta(P^2)$	باستخدام الضغط الزائف $m(p)$
الحالة المستقرة	$q_{sc} = \frac{703 \times 10^{-6} K_g \cdot h(p_e^2 - p_w^2)}{T \mu_g \cdot Z \cdot \ln(r_e / r_w)}$	$q_{sc} = \frac{703 \times 10^{-6} K_g \cdot h(m(p_e) - m(p_w))}{T \cdot \ln(r_e / r_w)}$
الحالة غير المستقرة	$\frac{\partial^2 p^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p^2}{\partial r} = \frac{\phi \cdot \mu_g \cdot c_i}{K_g} \frac{\partial p^2}{\partial t}$ $\frac{\partial \Delta P_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial \Delta P_D}{\partial r_D} = \frac{\partial \Delta P_D}{\partial t_D}$ $t_D = \frac{2.64 \times 10^{-4} K_g \cdot t}{\phi \cdot \mu_g \cdot c_i \cdot r^2}$ $t_{Dw} = \frac{2.64 \times 10^{-4} K_g \cdot t}{\phi \cdot \mu_g \cdot c_i \cdot r_w^2}$ $t_{De} = \frac{2.64 \times 10^{-4} K_g \cdot t}{\phi \cdot \mu_g \cdot c_i \cdot r_e^2}$ $t_{DA} = \frac{2.64 \times 10^{-4} K_g \cdot t}{\phi \cdot \mu_g \cdot c_i \cdot A}$ $q_D = \frac{1422 T q_{sc} \cdot \bar{Z} \cdot \mu_g}{K_g \cdot h \cdot p_i^2}$ $p_D = \frac{p^2}{p_i^2 q_D}$ $\Delta p_D = \frac{p_i^2 - p^2}{p_i^2 q_D}$	$\frac{\partial^2 m(p)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial m(p)}{\partial r} = \frac{\phi \cdot \mu_g \cdot C_i}{K_g} \frac{\partial m(p)}{\partial t}$ $\frac{\partial \Delta m(P)_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial \Delta m(P)_D}{\partial r_D} = \frac{\partial \Delta m(P)_D}{\partial t_D}$ $t_D = \frac{2.64 \times 10^{-4} K_g \cdot t}{\phi \mu_{gi} \cdot C_{ii} \cdot r^2}$ $t_{Dw} = \frac{2.64 \times 10^{-4} K_g \cdot t}{\phi \mu_{gi} \cdot C_{ii} \cdot r_w^2}$ $t_{De} = \frac{2.64 \times 10^{-4} K_g \cdot t}{\phi \mu_{gi} \cdot C_{ii} \cdot r_e^2}$ $t_{DA} = \frac{2.64 \times 10^{-4} K_g \cdot t}{\phi \mu_{gi} \cdot C_{ii} \cdot A}$ $q_D = \frac{1422 T q_{sc}}{K_g \cdot h \cdot m(p_i)}$ $m(p)_D = \frac{m(p)}{m(p_i) \cdot q_D}$ $\Delta m(p)_D = \frac{m(p_i) - m(p)}{m(p_i) \cdot q_D}$
الحالة المستقرة الزائفة	$\bar{P}_R^2 - P_{wf}^2 = B \cdot q_{sc} + F \cdot q_{sc}^2$ $B = \frac{1422 T \mu_g \cdot \bar{Z}}{K_g \cdot h} \left[\ln \left(\frac{0.472 r_e}{r_w} \right) + S \right]$ $F = \frac{1422 T \mu_g \cdot \bar{Z}}{K_g \cdot h} D$ $q_{sc} = \frac{703 \times 10^{-6} K_g \cdot h (\bar{P}_R^2 - P_{wf}^2)}{T \cdot \mu_g \cdot \bar{Z} \cdot [\ln(0.472 r_e / r_w) + S + D q_{sc}]}$	$m(\bar{p}_R) - m(p_{wf}) = B \cdot q_{sc} + F \cdot q_{sc}^2$ $B = \frac{1422 T}{K_g \cdot h} \left[\ln \left(\frac{0.472 r_e}{r_w} \right) + S \right]$ $F = \frac{1422 T}{K_g \cdot h} D$ $q_{sc} = \frac{703 \times 10^{-6} K_g \cdot h (m(\bar{p}_R) - m(p_{wf}))}{T [\ln(0.472 r_e / r_w) + S + D q_{sc}]}$
اختبار انخفاض الضغط	تمثيل بياني (p_{wf}^2) مقابل $\text{Log}(t)$ $S' = 1.151 \left[\frac{p_i^2 - p_{1hr}^2}{m} - \log \frac{K_g}{\phi \mu_g \cdot c_i \cdot r_w^2} + 3.23 \right]$	تمثيل بياني $(m(p_{wf}))$ مقابل $\text{Log}(t)$ $S' = 1.151 \left[\frac{m(p_i) - m(p_{1hr})}{m} - \log \frac{K_g}{\phi \cdot \mu_{gi} \cdot c_{ii} \cdot r_w^2} + 3.23 \right]$
اختبار استعادة الضغط	تمثيل بياني (p_{ws}^2) مقابل $\log \left(\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \right)$ $S' = 1.151 \left[\frac{p_{1hr}^2 - p_{wf}^2}{m} - \log \frac{K_g}{\phi \cdot \mu_g \cdot c_i \cdot r_w^2} + 3.23 \right]$	تمثيل بياني $(m(P_{ws}))$ مقابل $\log \left(\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \right)$ $S' = 1.151 \left[\frac{m(p_{1hr}) - m(p_{wf})}{m} - \log \frac{K_g}{\phi \cdot \mu_{gi} \cdot c_{ii} \cdot r_w^2} + 3.23 \right]$

الفصل الرابع

حساب الاحتياطي للمكامن الغازية

كل معادلات الجريان التي استخدمت في الفصول السابقة قد تضمنت اما الضغط الأولي للمكمن ، أو متوسط ضغط المكمن (\bar{P}_R) . ان هذه الضغوط هي توابع للغاز في شروط تواجده بالمكمن ويجب ان تقدر عند في ازمة مختلفة خلال فترة حياة المكمن . ان سعة الجريان أو العطاء للآبار تتخفض كلما انتج الغاز وينخفض بذلك (\bar{P}_R) . لهذا فمن الضروري تحديد (\bar{P}_R) مقابل الغاز المنتج (G_p) .

من اجل تقييم مكمن غازي ، فان الغاز الاصلي المتواجد في مكانه (الاحتياطي الجيولوجي) يجب ان يحدد ، كما يجب ان تحسب كمية الغاز المنتج عند قيم مختلفة لـ (\bar{P}_R) ،

٤-١- حساب احتياطي الغاز بالطريقة الحجمية:

تتطلب الطريقة الحجمية لتعيين الاحتياطي الجيولوجي من الغاز المتواجد في المكمن معلومات جيولوجية وافية لتحديد حجم المكمن والمسامية ودرجة التشبع بالماء وابعاد المكمن . ويجب تحديد ضغط المكمن أيضا ، لكن التاريخ الانتاجي للمكمن غير ضروري

تطبق هذه الطريقة بصورة رئيسية في الحقول الجديدة من اجل التقديرات الأولية.

ان معادلة حساب الاحتياطي الجيولوجي من الغاز هي:

$$G = \frac{43560 \times A \times h \times \Phi(1 - S_w)}{B_{gi}} \quad (4.1)$$

حيث ان:

G = الاحتياطي الجيولوجي ، قدم مكعب قياسي

A = مساحة المكمن ، فدان

h = متوسط سمك المكمن ، القدم

Φ = المسامية ، كسر

S_w = درجة التشبع بالماء ، كسر

B_{gi} = عامل حجم الغاز عند الشروط الأولية للمكمن ، قدم مكعب / قدم مكعب قياسي
يمكن تطبيق هذه المعادلة في الشروط الابتدائية والنهائية للمكمن الغازي.

يحسب الغاز المنتج كما يلي:

الغاز المنتج = الغاز الابتدائي - الغاز المتبقي

$$G_p = 43560 \times A \times h \times \emptyset (1 - S_w) \left(\frac{1}{B_{gi}} - \frac{1}{B_{ga}} \right) \Rightarrow$$

$$G_p = \frac{43560 \times A \times h \times \emptyset (1 - S_w)}{B_{gi}} \left(1 - \frac{B_{gi}}{B_a} \right) \quad (4.2)$$

حيث ان (B_{ga}) عامل حجم الغاز عند الضغط النهائي للمكمن (ضغط هجر المكمن).
بالمقارنة بين المعادلتين وحيث ان $(G_p = G \times R_f)$ نحصل على عامل مردود الغاز
(**Recovery Factor**) وهو كما يلي:

$$R_f = \frac{G_p}{G} = \left(1 - \frac{B_{gi}}{B_a} \right) \quad (4.3)$$

يفترض عند تطبيق الطريقة الحجمية ان حجم الفراغ المشغول بالغاز يكون ثابتا . وعند
وجود تدفق للمياه إلى المنطقة الغازية فعندها يتناقص حجم الفراغ المسامي المشغول
بالغاز بمقدار يساوي حجم الماء الداخل إلى المكمن. يتم حساب كمية الغاز التراكمي
المنتج كما يلي:

$$G_p = G - G_a = \frac{43560 \times A \times h \times \emptyset (1 - S_{wi})}{B_{gi}} - \frac{43560 \times A \times h \times \emptyset (1 - S_{wa})}{B_{gi}}$$

$$G_p = \frac{43560 \times A \times h \times \emptyset (1 - S_{wi})}{B_{gi}} - \frac{43560 \times A \times h \times \emptyset \cdot S_{gr}}{B_{gi}}$$

$$G_p = \frac{43560 \times A \times h \times \emptyset (1 - S_{wi})}{B_{gi}} \left(1 - \frac{B_{gi} \times S_{gr}}{B_{ga}(1 - S_{wi})} \right) \quad (4.4)$$

وعامل المردود يصبح:

$$R_f = 1 - \frac{B_{gi} \times S_{gr}}{B_{ga}(1 - S_{wi})} \quad (4.5)$$

٤-٢- حساب احتياطي الغاز بطريقة الموازنة المادية:

عند توفر معلومات كافية عن ضغط ومعدل انتاج المكنم الغازي، يمكن حساب الاحتياطي الجيولوجي (G) دون الحاجة لمعرفة كل من (A, h, S_w, Φ)، ويتم ذلك بكتابة معادلة توازن المادة كما يلي:

المولات المنتجة = المولات الابتدائية المتواجد في المكنم - المولات المتبقية

$$n_p = n_i - n \quad (4.6)$$

وبتطبيق القانون العام للغازات الحقيقية (P.V = Z.n.R.T) نحصل على:

$$(n_p = \frac{P_{sc}V_{sc}}{T_{sc}Z_{sc}} = \frac{P_{sc}G_p}{T_{sc}Z_{sc}} \quad ,, n_i = \frac{P_iV_i}{T_iZ_i} \quad ,, n = \frac{P.V_i}{T_f.Z} \quad ,, V_i = G \times B_{gi})$$

نعوض في المعادلة (4.6) فنحصل على:

$$\frac{P_{sc}G_p}{T_{sc}Z_{sc}} = \frac{P_iV_i}{T_fZ_i} - \frac{P.V_i}{T_f.Z} \quad (4.7)$$

حيث ان:

$$T_f = \text{درجة حرارة المكنم}$$

$$V_i = \text{حجم المكنم الغازي.}$$

$$P_i = \text{الضغط الأولي للمكنم.}$$

$$P = \text{ضغط المكنم بعد انتاج (G_p) بالمكعب القياسي.}$$

ان حجم المكنم الغازي يمكن ان يقدر بالقدم المكعب القياسي باستخدام (B_{gi}) كما

$$V_i = G \cdot B_{gi} \quad (4.8) \quad \text{يلي:}$$

ویدمج المعادلتين (4.6) و (4.7) والحل لايجاد قيمة (P/Z) نحصل على:

$$\frac{P}{Z} = \frac{P_i}{Z_i} - \frac{T_f P_{sc}}{T_{sc} B_{gi} \cdot G} G_p \quad (4.9)$$

من هذه المعادلة يتضح ان رسم (P/Z) مقابل (G_p) سيكون خطا مستقيما بميل قيمته

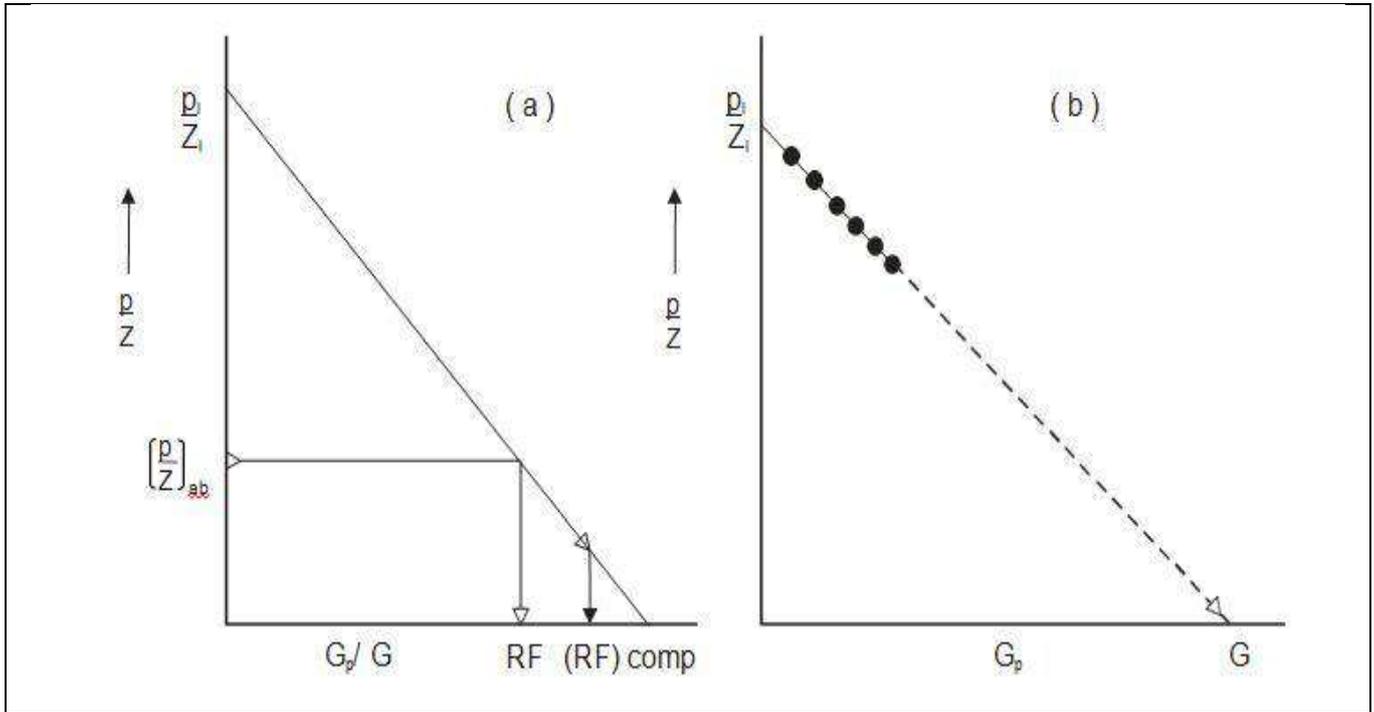
(T_fP_{sc}/T_{sc}B_{gi}G) والتقاطع عند (G_p=0) يساوي (P_i/Z_i). لهذا يمكن الحصول على

كلا من (G , P_i) من المخطط البياني. وبعد الحصول على هذه القيم، يمكن تعيين كمية

الغاز المنتج عند أي ضغط. كما يمكن التعبير عن المعادلة (4.8) كما يلي:

$$\frac{P}{Z} = \frac{P_i}{Z_i} \left(1 - \frac{G_p}{G} \right) \quad (4.10)$$

يوضح الشكل (4.1) المخططات النموذجية للمعادلتين (4.9) و(4.10) .



الشكل (4.1) مخططات توازن المادة للغاز

الشكل (4.1-a) يبين كيف يمكن تحديد عامل المردود (R_F) عن طريق ادخال قيمة $(\frac{p}{Z})_{ab}$ المقابلة لضغط الهجر (abandonment Pressure). ويبين انه يمكن زيادة عامل المردود (R_F) إلى القيمة $((R_F)_{comp})$ وذلك عند ضغوط اقل بكثير من ضغط الهجر باستخدام ضواغط على السطح لضغط الغاز (Gas compressing) في هذه الحالة يجب تعويض التكلفة المالية للضواغط بالإضافة إلى تكاليف التشغيل عن طريق زيادة عامل المردود .

الشكل (4.1-b) يوضح أيضا التقنيات الهامة في هندسة المخزون أي تطابق السجل الانتاجي للمكمن والاحتياطي مع المعلومات المتوقعة للمكمن . تمثل النقاط الدائرية السوداء والموصولة بخط متصل تاريخ المكمن قيد الدراسة واستمداد هذا الخط يتقاطع مع محور (G_p) بقيمة تساوي قيمة الاحتياطي الجيولوجي (G) للمكمن المدروس .

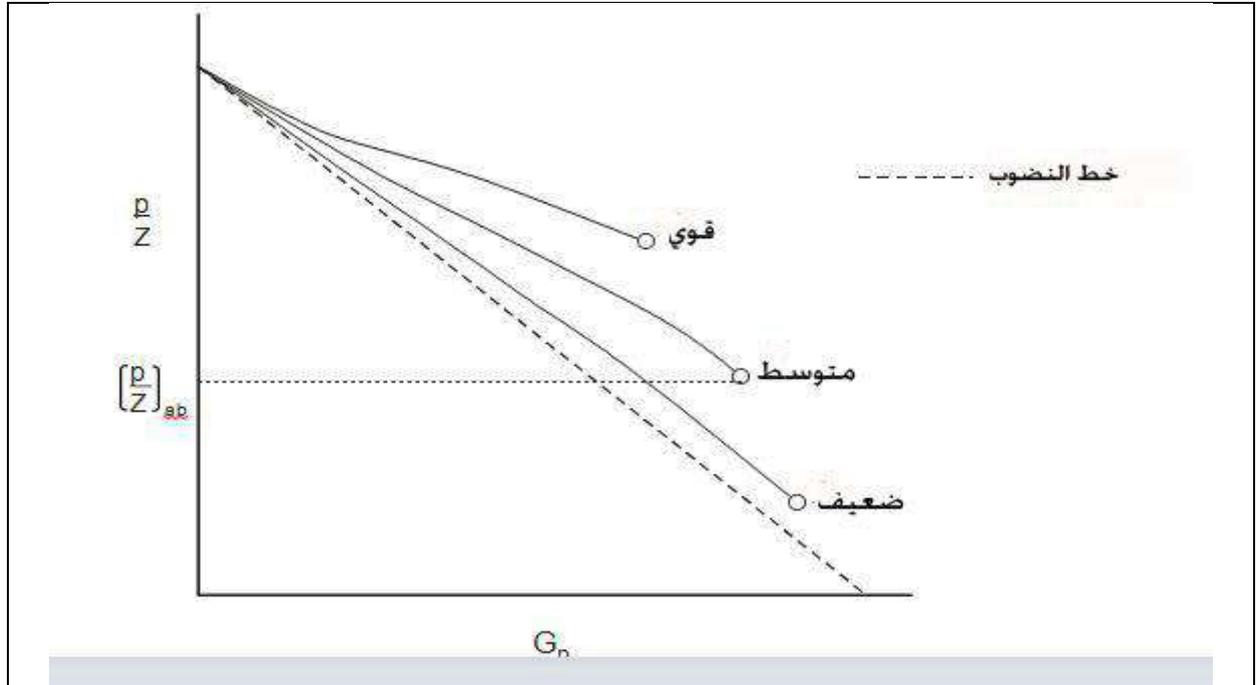
البحث اعلاه يطبق على مكمن لايتغير فيه حجم الفراغ المشغول بالغاز ،فاذا تواجد تدفق للمياه ، سيتم انخفاض (V_i) بسبب تدفق الماء كلما انخفض (P) .

بعبارة أخرى إذا تعرض المكمن لاجتياح المياه الجانبية فان حجم المسام المشغول بالغاز سيقبل بمقدار كمية المياه التي دخلت إلى المنطقة الغازية. كما ستدعم هذه المياه الضغط الطبقي والذي يجب ان يؤخذ بعين الاعتبار في حسابات الموازنة المادية.

المعادلة (4.9) ستصبح على الشكل التالي:

$$\frac{P}{Z} = \frac{P_i}{Z_i} \left(\frac{G \cdot B_{gi}}{G \cdot B_{gi} - W_e} \right) - \frac{T_f P_{sc}}{T_{sc} (G \cdot B_{gi} - W_e)} G_p \quad (4.11)$$

يتضمن الميل الان على مؤشر يتغير بالعلاقة مع (G_p) أو الزمن، وهذا المؤشر هو (W_e) بناء عليه فان رسم (P/Z) مقابل (G_p) سوف لن يستمر خطيا بل سيميل للأعلى مع انخفاض الضغط ويعتمد بذلك على قوة دفع المياه . وهذا موضح بالشكل رقم (4.2).



الشكل (4.2) يبين تأثير دفع الماء

هناك طرق كثيرة لحساب كمية المياه التراكمية التي تجتاح مكامن الهيدروكربون وسنذكر ابسطها وهي طريقة بوت.

٤-٢-١- نموذج بوت :

تعتبر هذه الطريقة واحدة من ابسط النماذج لتقدير كمية المياه التي تجتاح مكامن

الهيدروكربون، ورياضيا يعبر عنها كما يلي:

$$w_e = (c_w + c_f) f \times w_i (p_i - p) \quad (4 - 12)$$

$$w_i = \frac{\pi(r_a^2 - r_e^2)h \times \phi}{5.615} ; f = \frac{\theta}{360} \quad (4 - 13)$$

حيث ان:

θ زاوية ميل الطبقة المائية.

P_i, P الضغط الحالي والضغط الاولي للمكمن على الترتيب

W_i, W_e الكمية الكلية للمياه المتدفقة و الحجم الاولي للمياه في الطبقة المائية .

C_f, C_w هي انضغاطية المياه والصخر على الترتيب.

r_a, r_e هي نصف قطر المكمن ونصف قطر الطبقة المائية.

ϕ, h هي مسامية وسماكة الطبقة المائية على الترتيب.

ملاحظة : لايجوز استخدام طريقة الموازنة المادية في مرحلة مبكرة من عمر المكمن .
بعض شركات نقل الغاز تستعمل ضغط هجر (100 Psia) لكل (1000) قدم من عمق البئر .

٤-٣ - مخططات الطاقة (Energy plots)

هناك العديد من طرق المخططات البيانية قد تم اقتراحها في حل معادلة الموازنة المادية، والتي تعتبر مفيدة في الكشف عن وجود تدفق للماء. يمكن اعادة تنظيم المعادلة (2.29) واستخدام علاقة (B_{gi}) فنحصل على:

$$B_{gi} = \frac{P_{sc} Z_i T_f}{P_i T_{sc}}$$

$$\frac{Z_i \cdot P}{P_i \cdot Z} = \frac{G \cdot B_{gi}}{G \cdot B_{gi} - W_e} \left[1 - \frac{G_p}{G} \right] \quad (4.14)$$

عندما تكون ($W_e=0$) نحصل على:

$$1 - \frac{Z_i \cdot P}{P_i \cdot Z} = \frac{G_p}{G} \quad (4.15)$$

باخذ لوغاريتم طرفي المعادلة (4.14) ينتج:

$$\log \left[1 - \frac{Z_i \cdot P}{P_i \cdot Z} \right] = \log G_p - \log G \quad (4.16)$$

يتضح من المعادلة (4.16) ان رسم $1 - \frac{Z_i \cdot P}{P_i \cdot Z}$ مقابل (G_p) على ورق باحداثيات لوغاريتمية سيكون خطا مستقيما بميل يساوي واحد (زاوية 45°) ومن تمديد الخط المستقيم

إلى قيمة واحد على محور العينات ($P=0$) لان ($\log(1)=0$) فنحصل على قيمة الاحتياطي الجيولوجي الأولي (G) . المخططات البيانية التي يتم الحصول عليها في مثل هذا النوع من التحليل تعتبر مخططات للطاقة . ووجدت انها مفيدة للكشف عن تدفق الماء في وقت مبكر من حياة المكمن ، فاذا لم تكن قيمة (W_e) مساوية للصفر ، فان الميل سيكون اقل من الواحد وسيقل باستمرار مع الزمن وذلك لازدياد قيمة (W_e) مع الزمن . واما زيادة الميل يمكن ان تحصل فقط كنتيجة ام لتسرب الغاز من المكمن أو ان البيانات غير صحيحة ، لان زيادة الميل تعني ان حجم الفراغ المشغول بالغاز قد ازداد مع الزمن . وينطبق هذا على مخططات (P/Z) مقابل (G_p) أيضا .

٤-٤ - المكامن المضغوطة بشكل غير عادي (ذات الضغوط الشاذة)

(Abnormally Pressure Reservoirs)

في المكامن الغازية يكون الغاز فابلا للانضغاط أكثر بكثير من انضغاط كلا من الماء والصخور ، الامر الذي يبرر إهمال تمدد الماء والصخور في معدلة توازن المادة . اما في المكامن ذات الضغوط الشاذة فان هذا قد يؤدي إلى بعض الاخطاء في تحديد الاحتياطي الغازي ، ويتشمل انضغاطية الصخور والماء تصبح المعادلة (2.23) كما يلي:

$$\frac{P}{Z} = \frac{\frac{P_i}{Z_i} \left[1 - \frac{G_p}{G} \right]}{1 - \left[\frac{(P_i - P)(C_w S_{wi} + C_f)}{1 - S_{wi}} \right]} \quad (4.17)$$

حيث ان:

$$S_{wi} = \text{درجة التشبع الأولية بالماء}$$

$$C_w = \text{انضغاطية المياه المكمنية}$$

$$C_f = \text{انضغاطية صخور المكمن}$$

المسائل : (the Problems)

مسألة (1):

خليط غازي يحتوي بصورة رئيسية على النيتروجين والاكسجين وكميات قليلة من غازات أخرى والمطلوب: احسب الوزن الجزيئي الظاهري للهواء المعطى علما ان الوزن الجزيئي لكل مكون موضحة بالجدول التالي:

المكون	الكسر المولي
نتروجين	0.78
اوكسجين	0.21
ارغون	0.01
المجموع	1.00

الحل:

$$M_a = \sum y_i M_i = y_{N_2} M_{N_2} + y_{O_2} M_{O_2} + y_A M_A =$$

$$M_a = (0.78)(28.01) + (0.21)(32) + (0.01)(39.94)$$

$$M_a = 28.97 \approx 29$$

مسألة (2):

احسب الوزن النوعي للغاز بالمواصفات التالية:

المكون	الكسر المولي	M_i	$M_i \times y_i$
ميتان	0.85	16	13.60
ايتان	0.09	30.01	2.71
بروبان	0.04	44.1	1.76
نظامي البوتان	0.02	58.1	1.16
المجموع	1.00		19.23 = M_a

يتم الحصول على قيم (M_i) للمكونات النقية من الجداول الخاصة بذلك
ثم نحسب الجداء ($M_i \times y_i$)
يتم جمع نواتج الجداء ($M_i \times y_i$) فنحصل على
الوزن الجزيئي الظاهري

للغاز الطبيعي المعطى. فيكون الوزن النوعي للغاز الطبيعي المعطى هو :

$$\gamma_g = \frac{M_a}{29} = \frac{19.23}{29} = 0.66$$

مسألة (3):

احسب كتلة غاز الميثان الذي تحتويه اسطوانة حجمها (3.20) قدم مكعب تحت ضغط (1000) رطل /عقدة مربعة ودرجة حرارة (68) فهرنهايت. ثم احسب كتلة الغاز إذا افترضنا ان الغاز مثالي.

الحل:

يتم استخراج قيمة عامل انضغاط الغاز من المنحنيات (1.2) وكانت (0.89)

$$[^{\circ}R = ^{\circ}F + 460]$$

$$m_g = \frac{P.M.V}{Z.R.T} = \frac{(1000 \text{ Psia}) \left(16 \frac{\text{lb}}{\text{lb}} - \text{mole}\right) (3.2 \text{ cuft})}{(0.89) \left(10.73 \text{ Psia} \cdot \frac{\text{cuft}}{\text{lb-mole} \cdot ^{\circ}R}\right) (528 ^{\circ}R)} = 10.2 \text{ lb-Mas}$$

بافتراض ان الغاز مثالي:

$$m_g = \frac{P.M.V}{R.T} = \frac{(1000 \text{ Psia}) \left(16 \frac{\text{lb}}{\text{lb}} - \text{mole}\right) (3.2 \text{ cuft})}{(1) \left(10.73 \text{ Psia} \cdot \frac{\text{cuft}}{\text{lb-mole} \cdot ^{\circ}R}\right) (528 ^{\circ}R)} = 9.4 \text{ lb - Mas}$$

مسألة (4):

احسب كثافة الايتان تحت الضغط (900 Psia) ودرجة الحرارة (110 °F) .

الحل:

يتم الحصول على الصفات الحرجة من الجداول () وكانت :

$$P_C = 708 \text{ Psia} \quad , \quad T_C = 550 ^{\circ}R$$

$$T_r = \frac{T}{T_C} = \frac{(110 + 460)}{550} = 1.04$$

$$P_r = \frac{P}{P_C} = \frac{900}{708} = 1.27$$

من المنحنيات البيانية (1.2) نجد ان (z = 0.34)

$$\rho = \frac{P.M}{Z.R.T} = \frac{900 \times 30.1}{0.34 \times 10.73 \times 570} = 13.03 \text{ lb - m/ft}^3$$

وبافتراض السلوك المثالي للغاز فان القيمة المحسوبة للكثافة ستكون:

$$\rho = \frac{P.M}{Z.R.T} = \frac{900 \times 30.1}{1 \times 10.73 \times 570} = 4.43 \text{ lb} - m/ft^3$$

مسألة (5):

تم وضع (3 lb) من نظامي البوتان عند درجة الحرارة (120 °F) و (60 Psia) . احسب حجم الغاز بافتراض ان الغاز يسلك سلوكا مثاليا.

الحل:

١- يتم تحديد الوزن الجزيئي لنظامي البوتان من الجداول () وكان ($M_i=58.123$)

٢- يتم حساب حجم الغاز من المعادلة العامة للغازات المثالية كما يلي:

$$V = \frac{m R.T}{M P} = \frac{3 \cdot 10.73 \times (120 + 460)}{58.123 \cdot 60} = 5.35 \text{ ft}^3$$

مسألة (6):

المكون	y_i
CO ₂	0.05
C ₁	0.90
C ₂	0.03
C ₃	0.02

لدينا غاز طبيعي بالمكونات التالية:

بافتراض ان الغاز مثالي احسب مايلي:

١- الوزن الجزيئي الظاهري

٢- الوزن النوعي للغاز

٣- كثافة الغاز عند (2000 Psia) و (120 °F)

٤- الحجم النوعي عند (2000 Psia) و (150 °F)

الحل:

من الجداول () نحصل على قيمة الوزن الجزيئي لكل مكون في الجدول التالي:

١- حساب الوزن الجزيئي الظاهري:

$$M_a = \sum M_i y_i = 18.42$$

٢- حساب - الوزن النوعي للغاز:

$$\gamma_g = \frac{M_a}{29} = \frac{18.42}{29} = 0.636$$

٣- حساب كثافة الغاز عند (2000 Psia) و (120 °F):

$$\rho = \frac{P.M}{Z.R.T} = \frac{2000 \times 18.42}{1 \times 10.73 \times 610} = 5.628 \text{ lb/ft}^3$$

٤- حساب الحجم النوعي عند (2000

(Psia) و (150 °F):

$$v = 1/\rho = \frac{1}{5.628} = 0.178 \text{ Ft}^3/\text{lb}$$

المكون	y_i	M_i	$M_i \times y_i$
CO ₂	0.05	44.01	2.2
C ₁	0.90	16.04	14.436
C ₂	0.03	30.07	0.902
C ₃	0.02	44.11	0.882
المجموع	1.00	$M_a=18.42$	

المسألة (7):

غاز مكمني مكوناته كما في الجدول التالي رقم (١):

إذا كانت الشروط الأولية للمكمن هي:

$$P=3000 \text{ Psia}, T= 180 \text{ °F}$$

المطلوب:

١- احسب معامل انضغاطية الغاز الأولية للمكمن.

٢- كثافة الغاز عند الشروط الأولية للمكمن.

الحل:

من الجداول (A-2) يتم تحديد الخصائص الحرجة لمكونات

الغاز وهي مبينة بالجدول التالي رقم (٢):

يتم حساب الضغط شبه الحرج (الحرج الزائف) ودرجة الحرارة شبه الحرجة (الدرجة الزائفة)

كما يلي : (النتائج موضحة بالجدول رقم (٢)) حيث ان:

$$P_{pc} = \sum P_{ci} \times y_i = 666.38 \text{ Psia}$$

$$T_{pc} = \sum T_{ci} \times y_i = 383.38 \text{ °R}$$

يتم حساب الكميات شبه المصغرة (المصغرة الزائفة) كما يلي:

$$P_{pr} = \frac{P}{P_{pc}} = \frac{3000}{666.38} = 4.5$$

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}} = \frac{640}{383.38} = 1.67$$

من المنحنيات البيانية رقم (1.2) نجد انه عند القيم $(P_{pr} = 4.5)$ و $(T_{pr} = 1.67)$ ان عامل الانضغاط للغاز المعطى هو $(Z=0.85)$.

من المعادلة العامة للغازات الحقيقية نكتب:

$$P.V = Z.n.RT = Z \left(\frac{m_g}{M_a} \right) R.T \rightarrow \frac{V}{m_g} = \frac{Z.R.T}{P.M_a}$$

الوزن الجزيئي الظاهري للغاز يحسب من العلاقة التالية:

$$M_a = \sum M_i y_i = 20.226$$

ونتائج الحساب مبينة بالجدول رقم (٢).

ومنها يحسب الحجم النوعي كما يلي:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{Z.R.T}{P.M_a} = \frac{(0.85)(10.73)(640)}{(3000)(20.226)} = 0.0962 \text{ ft}^3/\text{lb} - m$$

تحسب الكثافة كما يلي:

$$\rho_g = \frac{1}{v} = \frac{1}{0.0962} = 1.0395 \approx 1.04 \text{ lb} - m/\text{ft}^3$$

المكون	y_i	M_i	$M_i \times y_i$	T_{Ci}	P_{Ci}	$T_{Ci} \times y_i$	$P_{Ci} \times y_i$
CO ₂	0.02	44.01	0.88	547.91	1071	10.96	21.42
N ₂	0.01	28.01	0.28	227.29	493.1	2.27	4.93
C ₁	0.85	16.04	13.634	343.33	666.4	291.83	566.44
C ₂	0.04	30.07	1.203	549.92	706.5	22	28.26
C ₃	0.03	44.11	1.323	666.06	616.4	19.98	18.48
i-C ₄	0.03	58.1	1.743	734.46	527.9	22.03	15.84
n-C ₄	0.02	58.1	1,162	765.62	550.6	15.31	11.01
المجموع	1.00		$M_a =$ 20.226			$T_{pc} =$ 383.38	$P_{pc} =$ 666.38

مسألة (٨):

باستخدام البيانات في المسألة (٧) احسب (P_{pc}) و (T_{pc}) باستخدام المعادلات (1.16) و (1.17) ثم احسب كثافة الغاز المعطى.

الحل:

١- حساب الوزن النوعي للغاز:

$$\gamma_g = \frac{M_a}{29} = \frac{20.23}{29} = 0.699$$

٢- حساب (T_{pc}) و (P_{pc}):

$$T_{pc} = 168 + 325(\gamma_g) - 12.5(\gamma_g)^2 = 168 + 325(0.699) - 12.5(0.699)^2 = 389.1 \text{ } ^\circ R$$

$$P_{pc} = 677 + 15(\gamma_g) - 37.5(\gamma_g)^2 = 677 + 15(0.699) - 37.5(0.699)^2 = 669.2 \text{ Psia}$$

٣- حساب (T_{pr}) و (P_{pr}):

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}} = \frac{640}{389.1} = 1.64$$

$$P_{pr} = \frac{P}{P_{pc}} = \frac{3000}{669.2} = 4.48$$

٤- من المنحنيات البيانية (1.2) نحصل على عامل انضغاط الغاز وكان ($Z=0.845$)

٥- حساب كثافة الغاز:

$$\rho_g = \frac{P \cdot M_a}{Z \cdot R \cdot T} = \frac{(3000)(20.23)}{(0.845)(10.73)(640)} = 10.46 \text{ lb/ft}^3$$

مسألة (٩):

غاز طبيعي حامضي وزنه النوعي (0.7) وبتحليله تبين انه يحتوي على (CO_2 5 %) و (H_2S 10 %). احسب كثافة هذا الغاز عند الضغط (3000 Psia) ودرجة الحرارة ($160 \text{ } ^\circ F$).

الحل:

١- حساب (T_{pc}) و (P_{pc}):

$$T_{pc} = 168 + 325(\gamma_g) - 12.5(\gamma_g)^2 = 168 + 325(0.7) - 12.5(0.7)^2 = 389.38 \text{ } ^\circ R$$

$$P_{pc} = 677 + 15(\gamma_g) - 37.5(\gamma_g)^2 = 677 + 15(0.7) - 37.5(0.7)^2 = 669.1 \text{ Psia}$$

٢- حساب معامل التصحيح (e) لاحتواء الغاز على (CO₂) و (H₂S) :

$$e = 120(A^{0.9} - A^{1.6}) + 15(B^{0.5} - B^4)$$

$$A = y_{H_2S} + y_{CO_2} = 0.1 + 0.05 = 0.15$$

$$B = y_{H_2S} = 0.1$$

$$e = 120(0.15^{0.9} - 0.15^{1.6}) + 15(0.1^{0.5} - 0.1^4) = 19.35 \text{ } ^\circ F$$

٣- حساب درجة الحرارة الحرجة الزائفة المصححة لاحتواء الغاز على (CO₂) و (H₂S) :

$$T'_{PC} = T_{PC} - e = 389.38 - 19.38 = 370.03 \text{ } ^\circ R$$

٤- حساب الضغط الحرج الزائف المصحح لاحتواء الغاز على (CO₂) و (H₂S) :

$$P'_{PC} = \frac{P_{PC} \cdot T'_{PC}}{T_{PC} + B(1-B) \cdot e} = \frac{(669.1)(370.03)}{(389.38) + 0.1(1-0.1)(19.35)} = 634.35 \text{ Psia}$$

٥- حساب T_{pr} و P_{pr}

$$P_{pr} = \frac{P}{P_{pc}} = \frac{3000}{634.35} = 4.73$$

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}} = \frac{160 + 460}{383.38} = 1.68$$

٦- من المنحنيات (1.2) نجد قيمة عامل انضغاط الغاز وكان:

$$Z=0.86$$

٧- الوزن الجزيئي الظاهري للغاز :

$$M_a = 29 \times \gamma_g = 29 \times 0.7 = 20.3$$

٨- حساب كثافة الغاز :

$$\rho_g = \frac{P \cdot M_a}{Z \cdot R \cdot T} = \frac{(3000)(20.27)}{0.86(10.73)(620)} = 10.63 \text{ lb/ft}^3$$

مسألة (10):

غاز حامضي وزنه النوعي (0.7) ويحتوي على (CO₂) و (H₂S) والمطلوب:

١- احسب الوزن النوعي المصحح لهذا الغاز لاحتواء الغاز على (CO₂) و (H₂S)

٢- احسب الضغط الحرج الزائف ودرجة الحرارة الحرجة الزائفة المصححين لاحتواء الغاز

على (CO₂) و (H₂S). ٣- احسب كثافة هذا الغاز.

علما ان (P= 3500 Psia) و (T= 160 °F)

الحل:

١- حساب الوزن النوعي المصحح للهيدروكربونات لاحتواء الغاز على (CO₂) و (H₂S):

$$(\gamma_g)_{HC} = \frac{29\gamma_g - [y_{N_2}M_{N_2} + y_{CO_2}M_{CO_2} + y_{H_2S}M_{H_2S}]}{29[1 - y_{N_2} - y_{CO_2} - y_{H_2S}]}$$
$$(\gamma_g)_{HC} = \frac{29 \times 0.7 - [0 \times 28.01 + 0.05 \times 44.01 + 0.1 \times 34.08]}{29[1 - 0 - 0.05 - 0.1]}$$
$$(\gamma_g)_{HC} = 0.596$$

٢- حساب الضغط الحرج الزائف ودرجة الحرارة الحرجة الزائفة المصححين لاحتواء الغاز على (CO₂) و (H₂S):

$$(T_{PC})_{HC} = 168 + 325(\gamma_g)_{HC} - 12.5(\gamma_g^2)_{HC}$$
$$(T_{PC})_{HC} = 168 + 325 \times 0.596 - 12.5 \times 0.596^2 = 357.26 \text{ }^\circ\text{R}$$

$$(P_{PC})_{HC} = 677 + 150(\gamma_g)_{HC} - 37.5(\gamma_g^2)_{HC}$$
$$(P_{PC})_{HC} = 677 + 150 \times 0.596 - 37.5 \times 0.596^2 = 753.08 \text{ Psia}$$

$$P_{pr} = \frac{P}{P_{pc}} = \frac{3500}{753.08} = 4.65$$
$$T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}} = \frac{620}{357.26} = 1.74$$

ومن المنحنيات (1.2) نجد عامل انضغاط الغاز وكان (Z=0.885)

٣- حساب كثافة هذا الغاز

$$M_a = 29 \times 0.596 = 17.284$$
$$\rho_g = \frac{P \cdot M_a}{Z \cdot R \cdot T} = \frac{(3500)(17.284)}{0.885(10.73)(620)} = 10.275 \text{ lb/ft}^3$$

مسألة (11):

احسب عامل انضغاط غاز الميثان عند الضغط (1500 psia) ودرجة الحرارة (140 °F) وايضا عند الضغط (9000 psia) وعند درجة الحرارة (32 °F).

الحل:

من الشكل A.3 نجد ان $Z=0.92$

من الشكل A.3 نجد ان $Z=1.4$

مسألة (12):

إذا علمت ان تركيب خليط من الغاز الحامضي عند الضغط (1623 psia) ودرجة الحرارة (100 °F) هي كما في الجدول التالي:

A - حدد (Z-Factor) باستخدام طريقة (عزيز و ويتشيرت)

B - حدد الوزن النوعي وكثافة خليط الغاز المعطى.

الحل:

A - يحدد (Z-Factor) باستخدام طريقة (عزيز و ويتشيرت) كما يلي:

١- يتم تحديد الوزن الجزيئي الظاهري لخليط الغاز من العلاقة التالية:

$$M_a = \sum M_i y_i = 20.03$$

٢- يتم الحصول على درجات الحرارة والضغط الحرجة لمكونات الغاز المعطى من الجداول () والنتائج مبينة في الجدول التالي

٣- يتم حساب الكميات الحرجة الزائفة للخليط الغازي كما يلي:

$$P_{pc} = \sum P_{ci} \times y_i = 748.3 \text{ Psia}$$

$$T_{pc} = \sum T_{ci} \times y_i = 384.5 \text{ }^\circ\text{R}$$

٤- يتم حساب عامل التصحيح لاحتواء الغاز على مواد غير هيدروكربونية كما يلي:

$$e = 120(A^{0.9} - A^{1.6}) + 15(B^{0.5} - B^4)$$

$$A = y_{H_2S} + y_{CO_2} = 0.0735 + 0.0744 = 0.1479$$

$$B = y_{H_2S} = 0.0735$$

$$e = 120(0.1497^{0.9} - 0.1497^{1.6}) + 15(0.0735^{0.5} - 0.0735^4) = 19.91 \approx 20 \text{ } ^\circ F$$

٥- حساب الكميات الحرجة الزائفة المصححة كما يلي:

$$T'_{PC} = T_{PC} - e = 384.5 - 20 = 364.5 \text{ } ^\circ R$$

$$P'_{PC} = \frac{P_{PC} \cdot T'_{PC}}{T_{PC} + B(1-B) \cdot e} = \frac{(748.3)(364.5)}{(384.5) + 0.0735(1-0.0735)20} = 678.7 \text{ Psia}$$

٦- حساب الكميات المصغرة الزائفة لخليط الغاز:

$$P_{pr} = \frac{P}{p'_{PC}} = \frac{1623}{678.7} = 2.39$$

$$T_{pr} = \frac{T}{T'_{PC}} = \frac{560}{364.5} = 1.54$$

٧- يتم تحديد (Z-Factor) من المنحنيات (1.2) وكانت (Z= 0.82)

المكون	y_i	M_i	$M_i \times y_i$	T_{Ci}	P_{Ci}	$T_{Ci} \times y_i$	$P_{Ci} \times y_i$
CO ₂	0.0744	44.01	3.28	547.91	1071	40.7	79.8
N ₂	0.0081	28.01	0.23	227.29	493.1	1.8	4
H ₂ S	0.0735	34.08	2.5	672.4	1306	49.4	96
C ₁	0.8303	16.04	13.32	343.33	666.4	285	566.44
C ₂	0.013	30.07	0.39	549.92	706.5	7.1	28.26
C ₃	0.0007	44.10	0.31	666.06	616.4	0.5	18.48
المجموع	1.00		$M_a =$ 20.03			$T_{pc} =$ 384.5	$P_{pc} =$ 748.3

B- حساب قيم الوزن النوعي وكثافة خليط الغاز المعطى:

١- حساب الوزن النوعي:

$$\gamma_g = \frac{M_a}{29} = \frac{20.03}{29} = 0.69$$

٢- حساب الكثافة:

$$\rho_g = \frac{P \cdot M_a}{Z \cdot R \cdot T} = \frac{(1623)(20.03)}{0.82(10.73)(560)} = 6.6 \text{ lb/ft}^3$$

مسألة (١٣):

احسب انضغاطية غاز عند درجة حرارة (40 °F) وضغط (665 psia) إذا علمت ان الكميات الحرجة الزائفة هي : (T_{PC}=357 °R) و (P_{PC}=674 Psia).

الحل:

١- يتم حساب القيم المصغرة الزائفة لخليط الغاز:

$$P_{pr} = \frac{P}{P_{PC}} = \frac{665}{674} = 0.987$$

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{PC}} = \frac{40 + 460}{357} = 1.4$$

٢- من المنحنيات البيانية رقم (1.3) نحصل على:

$$C_r \times T_r = 1.62$$

$$C_r = \frac{1.62}{1.4} = 1.16$$

$$C = \frac{C_r}{P_{PC}} = \frac{1.16}{674} = 0.00172 \text{ Psia}^{-1}$$

يمكن حل المسألة باستخدام تقريب المقدار $(\frac{\partial Z}{\partial P_r})$ كما يلي:

P, Psia	P _{pr}	Z
615	0.912	0.88
665	0.986	0.87
715	1.060	0.861

$$C_r = \frac{1}{P_{Pr}} - \frac{1}{Z} \left[\frac{Z_1 - Z_2}{P_{Pr1} - P_{Pr2}} \right] = \frac{1}{0.986} - \frac{1}{0.87} \left[\frac{0.88 - 0.861}{0.912 - 1.060} \right]$$

$$C_r = 1.168$$

$$C_g = \frac{C_r}{P_{Pr}} = \frac{1.168}{674} = 0.00173 \text{ Psia}^{-1}$$

مسألة (١٤):

احسب عامل حجم غاز طبيعي وزنه النوعي (0.7) عند درجة حرارة (93 °C) وتحت ضغط مطلق (10343 KPa=1500.54 psia) .

$$P = 10343 \text{ KPa} = 1500.54 \text{ psia} = 102.08 \text{ kg/m}^2 \quad \text{الحل:}$$

$$T = 1.8 \times ^\circ\text{C} + 32 = 1.8 \times 93 + 32 = 199.4 \text{ }^\circ\text{F} = 199.4 + 460 = 659.4 \text{ }^\circ\text{R}$$

$$= 659.4 / 1.8 = 366.33 \text{ }^\circ\text{K}$$

تحديد عامل انضغاط الغاز (Z):

$$T_{pc} = 168 + 325(\gamma_g) - 12.5(\gamma_g)^2 = 168 + 325(0.7) - 12.5(0.7)^2 = 389.38 \text{ }^\circ\text{R}$$

$$P_{pc} = 677 + 15(\gamma_g) - 37.5(\gamma_g)^2 = 677 + 15(0.7) - 37.5(0.7)^2 = 669.1 \text{ Psia}$$

$$P_{pr} = \frac{P}{P_{PC}} = \frac{1500.54}{669.1} = 2.24$$

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{PC}} = \frac{659.4}{389.38} = 1.69$$

من المنحنيات رقم (1.2) نحصل على قيمة عامل انضغاط الغاز (Z=0.885) من المعادلات رقم (1.43) نجد:

$$B_g = 0.0283 \frac{Z.T}{P} = 0.0283 \frac{0.885 \times 659.4}{1500.54} = 0.011 \text{ ft}^3 / \text{scf}^3$$

وفي الجملة الدولية نجد :

$$B_g = 0.3495 \frac{Z.T}{P} = 0.3495 \frac{0.885 \times 366.33}{102.08} = 0.000311 \text{ m}^3 / \text{scm}^3$$

ت

مسألة (10):

باستخدام طريقة كل من كار (Karr) ولي (Lee)، احسب لزوجة غاز طبيعي وزنه النوعي (0.72) عند ضغط (2000 psia) ودرجة حرارة (140 °F).

الحل:

١- طريقة لي: تحسب اللزوجة من المعادلة (1.44) كما يلي:

$$\mu_g = k \cdot 10^{-4} \exp(x\rho_g^w)$$

$$\left[\begin{array}{l} k = \frac{(9.4 + 0.02M_a)T^{1.5}}{209 + 19M_a + T} \\ x = 3.5 + (986/T) + 0.01M_a \\ w = 2.4 - 0.02x \end{array} \right]$$

حيث ان الكثافة بوحدة g/cc

- حساب (M_a):

$$M_a = 29 \times 0.72 = 20.88$$

٢- حساب (P_{PC}) و (T_{PC}):

$$T_{pc} = 168 + 325(\gamma_g) - 12.5(\gamma_g)^2 = 168 + 325(0.72) - 12.5(0.72)^2 = 395.52 \text{ }^\circ R$$

$$P_{pc} = 677 + 15(\gamma_g) - 37.5(\gamma_g)^2 = 677 + 15(0.72) - 37.5(0.72)^2 = 668.36 \text{ Psia}$$

$$P_{pr} = \frac{P}{P_{PC}} = \frac{2000}{668.36} = 2.993$$

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{PC}} = \frac{140 + 460}{395.52} = 1.52$$

٣- من المنحنيات رقم (1.2) نجد ($Z=0.78$)

٤- حساب كثافة الغاز:

$$\rho_g = \frac{P \cdot M_a}{Z \cdot R \cdot T} = \frac{(2000)(20.88)}{0.78(10.73)(600)} = 8.3 \frac{lb}{ft^3} = \frac{8.3}{62.4} = 0.133 \text{ g/cc}$$

$$\left[\begin{array}{l} k = \frac{(9.4 + 0.02M_a)T^{1.5}}{209 + 19M_a + T} = \frac{(9.4 + 0.02 \times 20.88)600^{1.5}}{209 + 19 \times 20.88 + 600} = 119.67 \\ x = 3.5 + (986/T) + 0.01M_a = 3.5 + \frac{986}{600} + 0.01 \times 20.88 = 5.35 \\ w = 2.4 - 0.02x = 2.4 - 0.02 \times 5.35 = 1.33 \end{array} \right]$$

$$\mu_g = k \cdot 10^{-4} \exp(x\rho_g^w) = 119.67 \times 10^{-4} \exp(5.35 \times 0.133^{1.33}) = 0.01725 \text{ cp}$$

٢- طريقة كار:

١- تحديد اللزوجة عند الضغط الجوي (1 atm) ودرجة الحرارة ($140 \text{ }^\circ F$) من المنحنيات

البيانية رقم (1.4) وكانت ($\mu_1=0.0113$).

٢- تحديد النسبة $\left(\frac{\mu_g}{\mu_1}\right)$ من المنحنيات رقم (1.5) وكانت $\left(\frac{\mu_g}{\mu_1} = 1.5\right)$

٣- يتم حساب لزوجة الغاز كما يلي:

$$\mu_g = \mu_1 \left(\frac{\mu_g}{\mu_1}\right) = 0.0113 \times 1.5 = 0.0169 \text{ cp}$$

مسألة (١٦):

غاز طبيعي حامضي عند ضغط (4800 Psia) ودرجة حرارة (149 °F) يتكون من

المكونات المبينة في الجدول التالي، والمطلوب:

١- احسب الخواص الحرجة المصححة الزائفة .

٢- احسب كثافة الغاز ووزنه النوعي.

٣- احسب عامل حجم الغاز.

٤- احسب انضغاطية الغاز .

٥- احسب لزوجة الغاز.

الحل: ١- حساب الخصائص الحرجة الزائفة المصححة للغاز

١- نتائج حسابات (M_a) (P_{PC}) (T_{PC}) مبينة في الجدول التالي:

$$M_a = \sum y_i M_i = 20.243$$

$$P_{PC} = \sum y_i P_{Ci} = 791.8$$

$$T_{PC} = \sum y_i T_{ci} = 405.58$$

٢- حساب القيم المصححة لاحتواء الغاز على مواد غير هيدروكربونية:

$$A = y_{H_2S} + y_{CO_2} = 0.1841 + 0.0164 = 0.2005$$

$$B = y_{H_2S} = 0.1841$$

$$e = 120(0.2005^{0.9} - 0.2005^{1.6}) + 15(0.1841^{0.5} - 0.1841^4) = 25.5 \text{ } ^\circ F$$

$$T'_{PC} = T_{PC} - e = 405.58 - 25.5 = 380.08 \text{ } ^\circ R$$

$$P'_{PC} = \frac{P_{PC} \cdot T'_{PC}}{T_{PC} + B(1-B) \cdot e} = \frac{(791.8)(380.08)}{(405.58) + 0.1841(1-0.1841)25.5} = 735.22 \text{ Psia}$$

٣- حساب الكميات المصغرة الزائفة لخليط الغاز:

$$P_{pr} = \frac{P}{p'_{PC}} = \frac{4800}{735.22} = 6.53$$

$$T_{pr} = \frac{T}{T'_{pc}} = \frac{149 + 460}{380.08} = 1.6$$

٤- من المنحنيات (1.2) نجد ان (Z=0.917)

٢- حساب كثافة الغاز ووزنه النوعي.

$$\gamma_g = \frac{20.243}{29} = 0.698$$

$$\rho_g = \frac{P \cdot M_a}{Z \cdot R \cdot T} = \frac{4800 \times 20.243}{0.917 \times 10.73 \times (149 + 460)} = 16.22 \text{ lb} - \text{m}/\text{ft}^3$$

المكون	y _i	M _i	M _i ×y _i	T _{Ci}	P _{Ci}	T _{Ci} ×y _i	P _{Ci} ×y _i
CO ₂	0.0164	44.01	0.722	547.91	1071	8.982	17.6
N ₂	0.0236	28.01	0.661	227.29	493.1	5.355	11.611
H ₂ S	0.1841	34.08	6.27	672.4	1306	123.8	240.43
C ₁	0.77	16.04	12.35	343.33	666.4	264.34	518.29
C ₂	0.0042	30.07	0.126	549.92	706.5	2.31	2.97
C ₃	0.0005	44.10	0.022	666.06	616.4	0.333	0.31
i-C ₄	0.0003	58.1	0.0174	734.46	527.9	0.083	0.159
n-C ₄	0.0003	58.1	0.0174	765.62	550.6	0.092	0.165
i-C ₅	0.0001	72.1	0.0072	385.7	490.4	0.0386	0.049
n-C ₅	0.0001	72.1	0.0072	369.1	488.6	0.0369	0.0488
C ₆	0.0001	86.1	0.00861	453.7	436.9	0.0454	0.0437
C ₇ ⁺	0.0003	114.2	0.0343	564.22	360.6	0.169	0.108
من اجل C ₇ ⁺ نستخدم مواصفات الاوكتان النظامي							
المجموع	1.00		M _a = 20.243			T _{pc} = 405.58	P _{pc} = 791.8

٣- حساب عامل حجم الغاز .

$$B_g = 0.0283 \frac{Z.T}{P} = 0.0283 \frac{0.917 \times (149 + 460)}{1500.54} = 0.0033 \text{ ft}^3 / \text{scft}^3$$

٤- حساب انضغاطية الغاز: من المنحنىات البيانية رقم (1.3) نجد:

$$\begin{aligned} C_r \cdot T_r &= 0.5 \\ C_r &= \frac{C_r \cdot T_{pr}}{T_{pr}} = \frac{0.5}{1.6} = 0.3125 \\ C_g &= \frac{C_r}{P_{PC}} = \frac{0.3125}{735.22} = 4.25 \times 10^{-4} \text{ psia}^{-1} \end{aligned}$$

٥- حساب لزوجة الغاز بطريقة لي:

$$\begin{aligned} \mu_g &= k \cdot 10^{-4} \exp(x\rho_g^w) \\ \left[\begin{aligned} k &= \frac{(9.4 + 0.02M_a)T^{1.5}}{209 + 19M_a + T} = \frac{(9.4 + 0.02 \times 20.243)609^{1.5}}{209 + 19 \times 20.243 + 609} = 122.53 \\ x &= 3.5 + (986/T) + 0.01M_a = 3.5 + \frac{986}{609} + 0.01 \times 20.243 = 5.32 \\ w &= 2.4 - 0.02x = 2.4 - 0.02 \times 5.326 = 1.336 \end{aligned} \right. \end{aligned}$$

$$\rho_g = 16.22 \text{ lb} - \frac{m}{\text{ft}^3} = \frac{16.22}{62.4} = 0.26 \text{ g/cc}$$

$$\mu_g = k \cdot 10^{-4} \exp(x\rho_g^w) = 122.53 \times 10^{-4} \exp(5.32 \times 0.26^{1.36}) = 0.0295 \text{ cp}$$



مسائل الفصل الثاني

مسألة (١٧): باستخدام البيانات التالية وبافتراض ان البئر لازال في النظام الانتقالي،

احسب ضغط قاع البئر بعد مرور (1.5) يوم.

$$T=580 \text{ }^\circ\text{R} , h=36 \text{ ft} , q_{sc}=7000 \text{ scftd} , \Phi=0.15 , K=20 \text{ md}$$

$$P_i=2000 \text{ psia} , Z=0.85 , \mu=0.0152 \text{ cp} , r_w=0.4 \text{ ft} , r_e=2000 \text{ ft}$$

$$C=0.00061 \text{ Psia}^{-1}$$

الحل:

احسب (t_D) عندما تكون ($r_w=r$)

$$t_{Dw} = \frac{2.64 \times 10^{-4} kt}{\Phi \mu C r_w^2} = \frac{2.64 \times 10^{-4} \times 20 \times 36}{0.15 \times 0.0152 \times 0.00061 \times (0.4)^2} = 8.54 \times 10^5$$

احسب (ΔP_D):

$$\Delta P_D = 0.5(\ln(8.54 \times 10^5) + 0.809) = 7.23$$

احسب (q_D):

$$q_D = \frac{1422 T q_{sc} Z \mu}{K h P_i^2}$$
$$q_D = \frac{1422(580)(7000)(0.85)(0.0152)}{20(36)(2000)^2} = 0.0259$$

حساب (P_w):

$$P_w^2 = P_i^2 - P_i^2 q_D \Delta P_D$$
$$P_w^2 = 2000^2 - 2000^2(0.0259)(7.23) = 3250972$$
$$P_w=1803 \text{ psia}$$

المعادلة (2.18) تطبق للقيم الزمنية اللابعدية التي تستند على ان نصف قطر تصريف

البئر اقل من (0.25) أي ان البئر لازال في التأثير الغير محدود.

مسألة (١٨):

باستخدام البيانات في المسألة (١٧) اوجد ضغط قاع البئر بعد انتاجه لفترة (1800) ساعة.

الحل:

تأكد من امكانية تطبيق حالة الجريان في المكامن المحدودة أو حالة الجريان شبه المستقرة:

$$t_{De} = \frac{2.64 \times 10^{-4} kt}{\phi \mu C r_e^2} = \frac{2.64 \times 10^{-4} \times 20 \times 1800}{0.15 \times 0.0152 \times 0.00061 \times (2000)^2} = 1.71$$

وبما انه ($t_{De} > 0.25$) ، البئر ذو تأثير محدود، وبالتالي تحسب (t_{Dw}) كما يلي:

$$t_{Dw} = \frac{t_{De} r_e^2}{r_w^2} = \frac{(1.71)(2000)^2}{(0.4)^2} = 4.271 \times 10^7 (> 100)$$

$$r_{De} = \frac{r_e}{r_w} = \frac{2000}{0.4} = 5000$$

$$\Delta P_{Dw} = \frac{2t_{Dw}}{r_{De}^2} + \ln(0.472 r_{De})$$

$$\Delta P_{Dw} = \frac{2(4.271 \times 10^7)}{(5000)^2} + \ln(0.472(5000)) = 11.183$$

في المسألة (١٧) وجدنا ان ($q_D = 0.0259$)

$$P_w^2 = P_i^2 (1 - q_D \Delta P_{Dw}) = (2000)^2 (1 - 0.0259(11.183))$$

$$P_w^2 = 2.841 \times 10^6 \rightarrow P_w = 1686 \text{ psia}$$

مسألة (١٩):

اعد حل المسألة (١٨) إذا كان البئر يقع في مركز مكنم مستطيل (1×4) وكانت مساحة التصريف تمثل (220 acres) .

الحل:

$$A = 220 \text{ acres} = 220 \times (43560) = 9.58 \times 10^6 \text{ ft}^2$$

التدقيق هل الحالة مستقرة زائفة:

$$t_{DA} = \frac{2.64 \times 10^{-4} kt}{\phi \mu C r_e^2} = \frac{2.64 \times 10^{-4} \times 20 \times 1800}{0.15 \times 0.0152 \times 0.00061 \times (9.58 \times 10^6)} = 0.71$$

بما انه ($t_{DA} > 0.7$) ، فان البئر في حالة جريان الحالة المستقرة الزائفة.

من الجدول (2.2) نجد $C_A = 5.38$

$$\Delta P_D = 0.5 \left[\ln\left(\frac{A}{r_w^2 \cdot C_A}\right) + 0.809 \right] + 2\pi \cdot t_{DA}$$

$$\Delta P_D = 0.5 \left[\ln\left(\frac{9.58 \times 10^6}{(0.4)^2 (5.38)}\right) + 0.809 \right] + 2\pi \cdot (0.71) = 12.978$$

$$P_w^2 = P_i^2 (1 - q_D \Delta P_D) = (2000)^2 (1 - 0.0259(12.978))$$

$$P_w^2 = 2.655 \times 10^6 \rightarrow P_w = 1630 \text{ Psia}$$

مسائل الفصل الثالث

المسألة (٢٠):

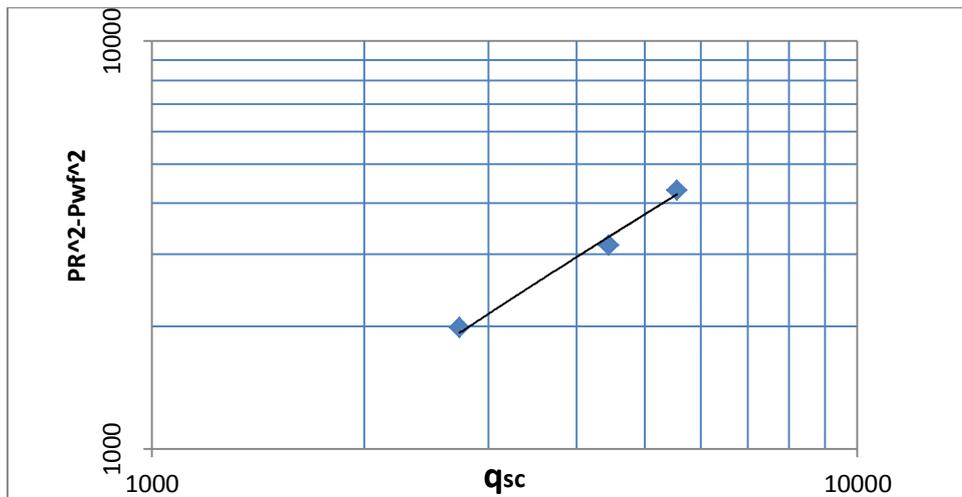
تم اختبار بئر غازي يقع في مكنن ذو ضغط منخفض وذو نفوذية عالية بطريقة معدلات الجريان المتعاقبة (Flow after Flow)، باستخدام البيانات المبينة في الجدول التالي والمطلوب:

- ١- حدد قيمة كل من (n) و (C) واستنتج المعادلة العامة لعطاء هذا البئر.
- ٢- حدد قيمة (AOF) وقيمة معدل الجريان المسموح به لهذا البئر.
- ٣- حدد معدل التدفق المقابل لضغط قاع البئر الجرياني ($P_{wf}=160$ Psia).

الحل:

١- لتحديد قيمة (n) ، نرسم (q_{sc}) مقابل (ΔP^2) على ورق بياني بإحداثيات لوغاريتمية

Test	q_{sc} , Mscfd	P_{wf} , Psia	$(P_R^2 - P_{wf}^2), Psia^2$
—	0	$201 = P_R$	$40400 = P_R^2$
1	2730	196	1985
2	4440	193	3152
3	5550	190	4403



$$n = \frac{(\log 2370 - \log 5550)}{(\log 1985 - \log 4301)} = 0.91757 \approx 0.92$$

$$C = \frac{q_{sc}}{(\Delta P^2)^n} = \frac{5550}{(4301)^{0.92}} = 2.52$$

المعادلة العامة لعطاء هذا البئر هي:

$$q_{sc} = 2.52(P_R^2 - P_{wf}^2)^{0.92}$$

٢- تحديد قيمة (AOF) وقيمة معدل الجريان المسموح به لهذا البئر.

$$AOF = 2.52(201^2 - 14.7^2)^{0.92} = 43365 \text{ Mscfd}$$

المعدل المسموح به لهذا البئر هو:

$$1/3 AOF = 43365/3 = 14455 \text{ Mscfd}$$

٣- تحديد معدل التدفق المقابل لضغط قاع البئر الجرياني ($P_{wf} = 160 \text{ Psia}$).

$$q_{sc} = 2.52(201^2 - 160^2)^{0.92} = 17300.88 \text{ Mscfd}$$

المسألة (٢١): تم اختبار معدلات الجريان المتعاقبة لبئر غازي ، والبيانات التي تم

الحصول عليها لمعدلات التدفق وضغوط قاع البئر المقابلة لها مبينة في الجدول التالي

والمطلوب: ١- حدد قيمة كل من (n) و (C) واستنتج المعادلة العامة لعطاء هذا البئر.

٢- حدد قيمة (AOF) وقيمة معدل الجريان المسموح به لهذا البئر.

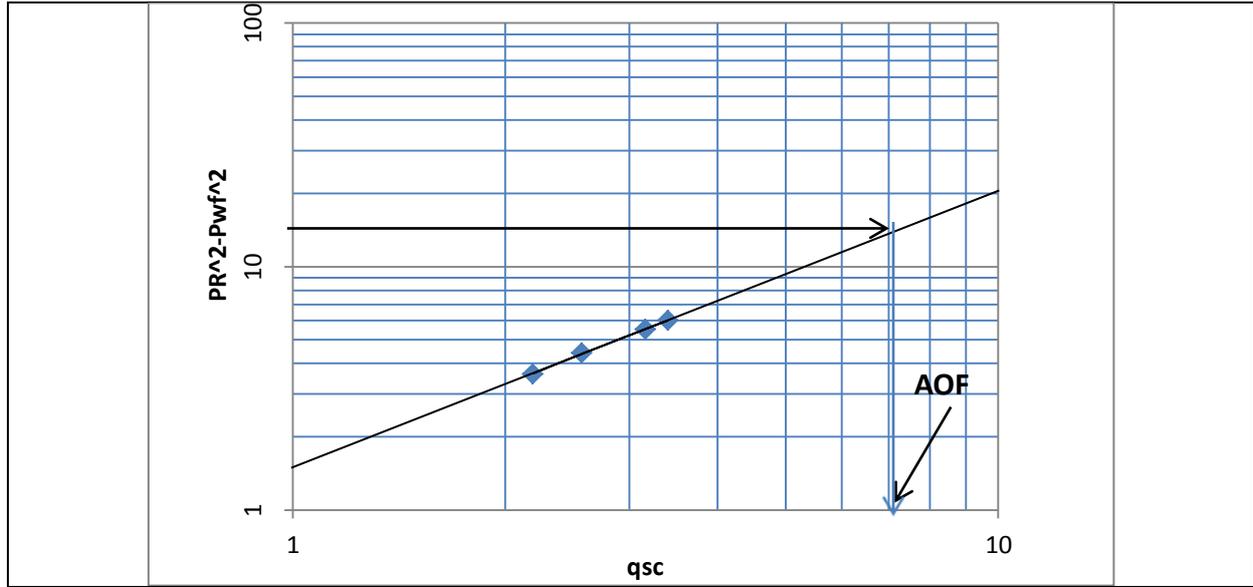
الحل:

١- تحديد قيمة كل من (n) و (C) واستنتج المعادلة العامة لعطاء هذا البئر:

نرسم المنحني الذي يمثل (q_{sc}) مقابل ($P_R^2 - P_{wf}^2$) على ورق بياني بإحداثيات لوغاريتمية

ثم نصل النقاط بخط مستقيم كما في الشكل التالي:

Test	q_{sc} ,MMscfd	P_{wf} ,M Psia	$(P_R^2 - P_{wf}^2)$,MM $Psia^2$
—	0	$3.884 = P_R$	$15.09 = P_R^2$
1	2.190	3.387	3.62
2	2.570	3.268	4.41
3	3.160	3.092	5.53
4	3.400	3.015	6.00



نختار نقطتين على المستقيم بشكل اختياري بحيث تكونان بعيدتان عن بعضهما قدر الامكان
حيث اخترنا النقطتين التاليتين:

$$q_{sc1} = 1 \text{ MMscfd} \quad (P_R^2 - P_{wf}^2) = 1.5, \text{MMPSia}^2$$

$$q_{sc2} = 10 \text{ MMscfd} \quad (P_R^2 - P_{wf}^2) = 20, \text{MMPSia}^2$$

$$n = \frac{(\log 10 - \log 1)}{(\log 20 - \log 1.5)} = 0.8889 \approx 0.89$$

أو يتم قياس زاوية ميل الخط المستقيم وكانت (48.2) درجة

$$n = \frac{1}{\tan(48.2)} = \frac{1}{1.118} = 0.894$$

$$C = \frac{q_{sc}}{(\Delta P^2)^n} = \frac{2}{(3.3)^{0.89}} = 0.691$$

أو نحدد قيمة (C) من تقاطع الخط المستقيم من المنحني البياني مع محور مربع الضغط

المعادلة العامة لعطاء هذا البئر هي:

$$q_{sc} = 0.691(P_R^2 - P_{wf}^2)^{0.89}$$

٢- تحديد قيمة (AOF) وقيمة معدل الجريان المسموح به لهذا البئر:

$$AOF = 0.691(15.09^2 - (14.7)^2 \times 10^{-6})^{0.89} = 7.734 \text{ MMscfd}$$

المعدل المسموح به لهذا البئر هو:

$$1/3 \text{ AOF} = 7.734/3 = 2.578 \text{ MMscfd}$$

من المنحني البياني نجد ان : (AOF = 7.2 MMscfd)

المسألة (٢٢):

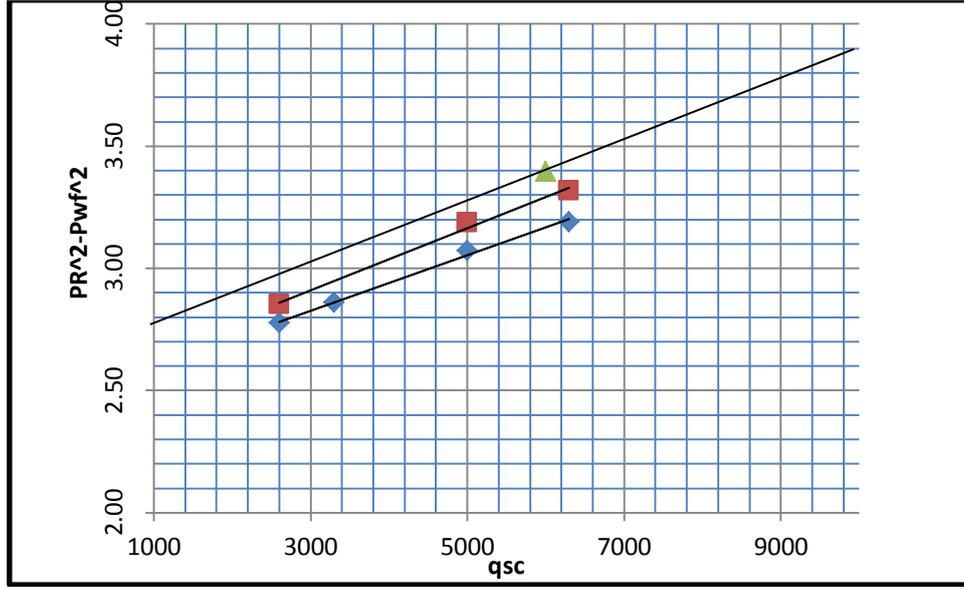
تم تنفيذ اختبار الفترات الزمنية المتساوية للبئر يقع في مكنن متوسط الضغط فيه 1952 Psia وتم الجريان في البئر على اربع فالات ذات فتحات مختلفة وتم قياس معدلات الجريان وضغوط قاع البئر عند الازمنة (3) و (6) ساعات لكل فالة ومن ثم إجراء اختبار موسع لمدة (72) ساعة بمعدل جريان (6 MMscfd) عند ضغط قاع البئر (1151 Psia). باستخدام البيانات الموضحة في الجدول التالي :

- ١- اوجد معادلة التصرف المستقر لهذا البئر.
- ٢- اوجد اقصى معدل للجريان المفتوح واحسب معدل الجريان المسموح به لهذا البئر.
- ٣- ارسم منحنى ادائية التدفق .

الحل:

نرسم على نفس الورقة البيانية وباحداثيات لوغاريتمية (أو نحسب لوغاريتم معدل التدفق ومربع فرق الضغط ونمثل النتائج على ورق بياني باحداثيات ديكارتية) خطين احدهما يمثل خط الثلاث ساعات والثاني يمثل خط الست ساعات ، ثم نمثل القيمة عند الجريان الموسع على نفس المنحنى ونرسم منها خطا مستقيما يوازي الخطين السابقين كما هو موضح في الشكل التالي.

Test	q_{sc} , Mscfd	t= 3 hr		t= 6 hr	
		P_{wf} Psia	$(P_R^2 - P_{wf}^2)Psia^2$	P_{wf} Psia	$(P_R^2 - P_{wf}^2)Psia^2$
1	2600	1793	595	1761	709
2	3300	1757	724	1657	1064
3	5000	1623	1177	1510	1530
4	6300	1505	1545	1320	2068
5	Extended $q_{sc}= 6000$ Mscfd t=72 hr		1151	2485	



لحساب قيمة (n) نستخدم أي نقطتين متباعدتين قدر الامكان على احد المنحنيات البيانية السابقة وقد اخترنا النقطتين الأولى والاخيرة في اختبار الست ساعات :

$$n = \frac{\log q_1 - \log q_2}{\log(\Delta P^2)_1 - \log(\Delta P^2)_2} = \frac{\log 2600 - \log 6300}{\log 709 - \log 2.68} = 0.83$$

نحسب (C) باستخدام نقطة الاختبار الموسع أو أي نقطة على المنحني المستقر (الخط المار من نقطة الجريان الموسع والموازي للخطين غير المستقرين)

$$C = \frac{q_{sc}}{(P_R^2 - P_{wf}^2)^n} = \frac{6000}{(2485 \times 10^3)^{0.83}} = 0.0295$$

وبذلك فان معادلة العطاء لـ (q_{sc}) بوحدة (Mscfd) ستكون:

$$q_{sc} = 0.0295(P_R^2 - P_{wf}^2)^{0.83}$$

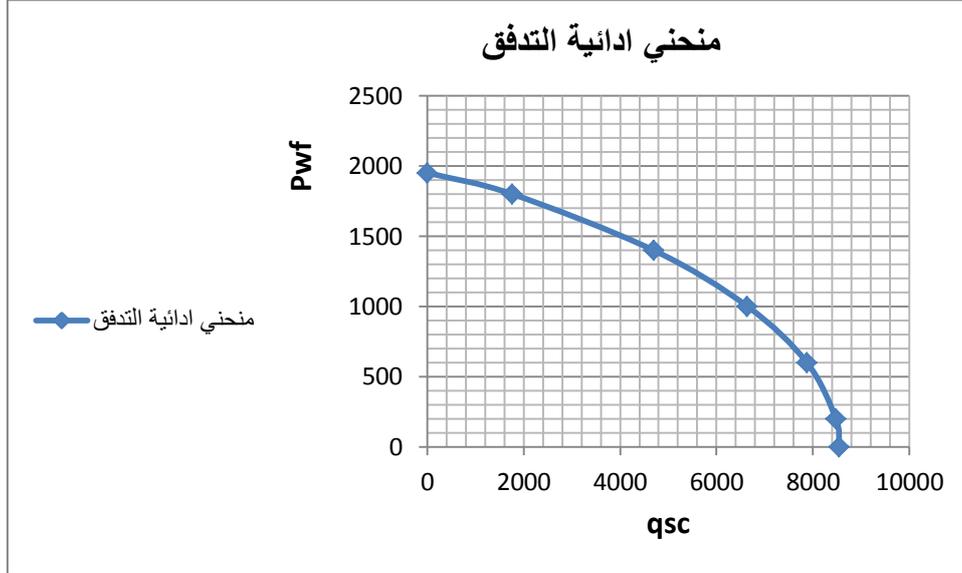
$$q_{AOF} = 0.0295(1952^2 - 14.7^2)^{0.83} = 8551 \text{ Mscfd}$$

ويكون معدل التدفق المسموح به لهذا البئر هو:

$$\frac{1}{3} q_{AOF} = \frac{1}{3} \times 8551 = 2850 \text{ Mscfd}$$

٣- لرسم منحني ادائية التدفق نختار بضع قيم لـ () ثم نحسب () المقابلة لها من المعادلة العامة للتصريف التي حصلنا عليها:

Q_{sc} ,Mscfd	P_{wf} ,Psia
0	1952
1768	1800
4695	1400
6642	1000
7875	600
8477	200
8551	0



المسألة (٢٣):

تم تنفيذ اختبار الفترات الزمنية المتساوية (الاختبار المعدل) لبئر يقع في مكنن متوسط الضغط فيه 3600 Psia وتم إجراء اختبار موسع لمدة (48) ساعة بمعدل جريان (68 MMscfd) عند ضغط قاع البئر (3000 Psia). باستخدام البيانات الموضحة في الجدول

التالي :

١- اوجد معادلة التصرف المستقر لهذا البئر.

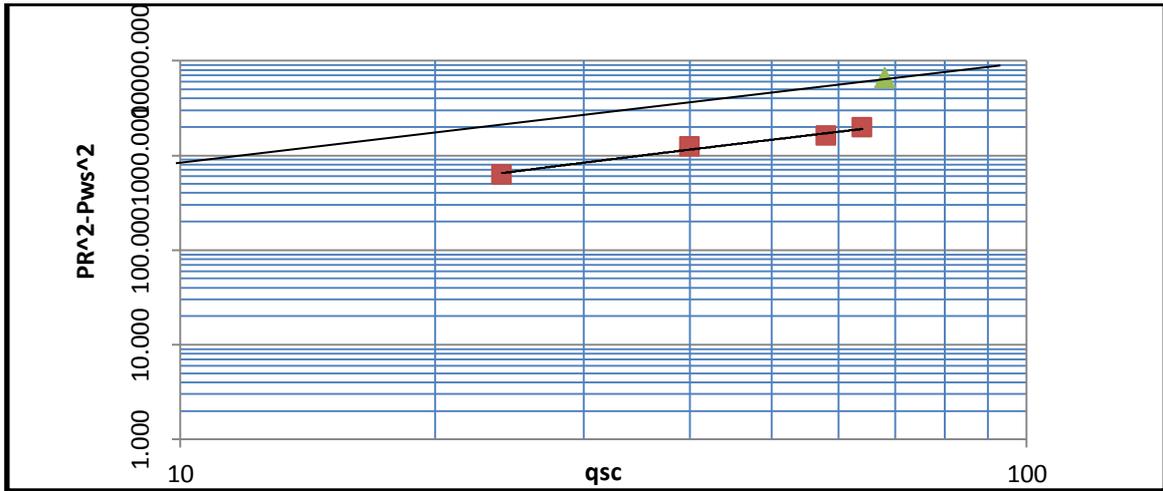
٢- اوجد اقصى معدل للجريان المفتوح.

الحل:

نرسم الذي يمثل $((P_R^2 - P_{ws}^2))$ مقابل (q_{sc}) على ورق بإحداثيات لوغاريتمية ونمثل عليه

النقطة التي تمثل $(P_R^2 - P_{wf}^2)$ مقابل (q_{sc}) للجريان الموسع كما في الشكل التالي:

Test	t,hr	Q_{sc} , MMscfd	P_{wf} , Psia	P_{ws} , Psia	$(P_R^2 - P_{ws}^2)$, MPsia ²
1	3	24	3410	3500	622
2	3	40	3310	3490	1224
3	3	58	3230	3470	1608
4	3	64	3170	3466	1964
Extended	48	68	3000	PR=3600 Psia	$(P_R^2 - P_{wf}^2)$ $= 3600^2 - 3000^2$ $= 3960$ Mpsia



في المنحني السابق، بما ان النقاط الأولى والرابعة تقع على الخط المستقيم نعتمدها لحساب (n) كما يلي:

$$n = \frac{\log q_1 - \log q_2}{\log(\Delta P^2)_1 - \log(\Delta P^2)_2} = \frac{\log 24 - \log 64}{\log 622 - \log 1964} = 0.853$$

يتم حساب (C) من نقطة الجريان الموسع أو أي نقطة على المنحني المستقر:

$$C = \frac{q_{sc}}{(P_R^2 - P_{wf}^2)^n} = \frac{68 \times 10^6}{(3000 \times 10^3)^{0.853}} = 203 \text{ scfd/Psia}^{0.853}$$

المعادلة العامة لتصريف (لعطاء) البئر هي:

$$q_{sc} = 203(P_R^2 - P_{wf}^2)^{0.853}$$

٢- حساب AOF :

$$AOF = 203(3600^2 - 14.7^2)^{0.853} = 236.9 \text{ MM Psia}$$

المسألة (٢٤):

تم تنفيذ اختبار معدلات الجريان المتعاقبة لبئر غازي ، باستخدام بيانات هذا الاختبار حدد مايلي:

١- معامل جريان دارسي (B) ومعامل الجريان اللادارسي (F).

٢- المعادلة ثنائية الحد لجريان هذا البئر.

الحل:

Test	q_{sc} , MMscfd	P_{wf} , Psia	$(P_R^2 - P_{wf}^2)$ Psia ²	$\left(\frac{P_R^2 - P_{wf}^2}{q_{sc}}\right)$
-	0	$P_R = 1800$	-	-
1	12	1705	332.975	27.748
2	20	1655	500.975	25.049
3	29	1615	631.775	21.785
4	38	1585	727.775	19.152

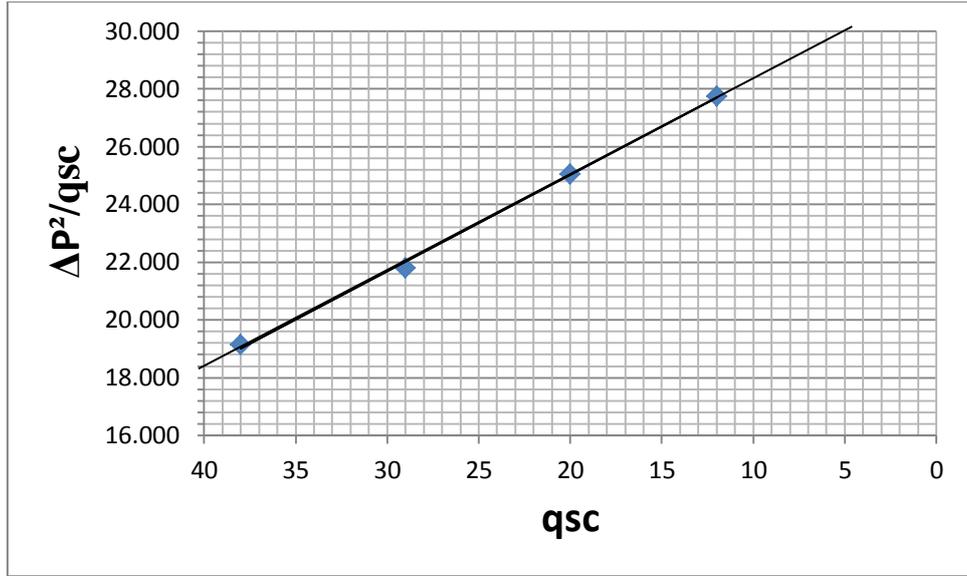
بعد حساب $\left(\frac{P_R^2 - P_{wf}^2}{q_{sc}}\right)$ كما هو مبين في الجدول السابق نرسم $\left(\frac{P_R^2 - P_{wf}^2}{q_{sc}}\right)$ مقابل (q_{sc}) على

ورق لوغاريتمي باحداثيات ديكارتية كما هو مبين في الشكل التالي:

التقاطع مع محور العينات هو : $A=18.4$

اما ميل المستقيم فيحسب من نقطتين على الخط المستقيم كما يلي:

$$F = \tan(\alpha) = \frac{19.152 - 27.748}{12 - 38} = 0.334$$



٢- المعادلة ثنائية الحد لتصريف البئر هي:

$$P_R^2 - P_{wf}^2 = 18.4 q + 0.334 q^2$$

المسألة (٢٥):

تم اختبار تساوي الزمن الاختبار المعدل على بئر بمعدلات تدفق مختلفة مقابل ضغوط مختلفة لقاع البئر وقد تم القياس عند الفترات الزمنية (1,2,4,6,8, hrs) ، وخصائص الممكن والغاز ونتائج القياسات كانت كما يلي:

$$h= 12 \text{ ft} , r_w=0.23\text{ft} , \Phi=0.23 , T=582 \text{ }^\circ\text{R} , \bar{P}_R = 922.6 \text{ Psia} ,$$

$$r_e=2000 \text{ ft} , \mu=0.0116 \text{ CP} , Z=0.972 , C=0.00109 \text{ Psia}^{-1}$$

P_{ws}				
	922.6	921.9	919.9	917.6
P_{wf}				
T, hr	q=0.4746	q=0.8797	q=1.2716	q=1.6589
1	900.1	863.0	789.9	676.3
2	897.1	853.9	769.9	662.2
4	892.2	833.0	754.9	642.0
6	890.1	827.9	732.8	635.2
8	888.1	825.1	727.3	629.3

المطلوب : حدد (D,S,K) واوجد معادلة التصريف المستقر ثنائية الحد لهذا البئر .

الحل:

تم تنظيم الجدول التالي لحساب كل من (B_t) و (F) ، ولتوضيح الطريقة أكثر تم حساب القيم المدونة في الجدول التالي وللفترة الزمنية $(t=2 \text{ hr})$ بصورة تفصيلية كما يلي:
بالنسبة للمعدل $(q=0.4646)$ مليون قدم مكعب قياسي في اليوم :

$$\Delta(P^2) = P_{ws}^2 - P_{wf}^2 = 922.6^2 - 897.1^2 = 46.402 \text{ Psia}^2$$

$$\frac{\Delta(P^2)}{q} = \frac{46402}{0.4746} = 97767 \frac{\text{Psia}^2}{\text{MMscfd}} = 97.767 \frac{\text{MPsia}^2}{\text{MMscfd}}$$

	q	q ²	t=1 hr		t=2 hr		t=4 hr		t=6 hr		t=8 hr	
			ΔP^2	$\frac{\Delta P^2}{q}$								
1	0.4746	0.2252	41.01	86.410	46.40	97.767	55.17	116.245	58.91	124.126	62.47	131.627
2	0.8797	0.7739	105.13	119.507	120.75	137.263	156.01	177.345	164.48	186.973	169.11	192.235
3	1.2716	1.6170	207.97	163.550	253.47	199.332	276.34	217.317	309.22	243.174	317.25	249.489
4	1.65890	2.7519	384.61	231.846	403.48	243.221	429.83	259.105	438.51	264.338	445.97	268.835
Σ	4.2848	5.3680	738.72	601.313	824.10	677.583	917.35	770.012	971.12	818.611	994.80	842.187
			$A_t = 20.11$ $B = 121.57$		$A_t = 34.11$ $B = 126.30$		$A_t = 65.15$ $B = 118.89$		$A_t = 74.94$ $B = 121.09$		$A_t = 83.00$ $B = 119.07$	

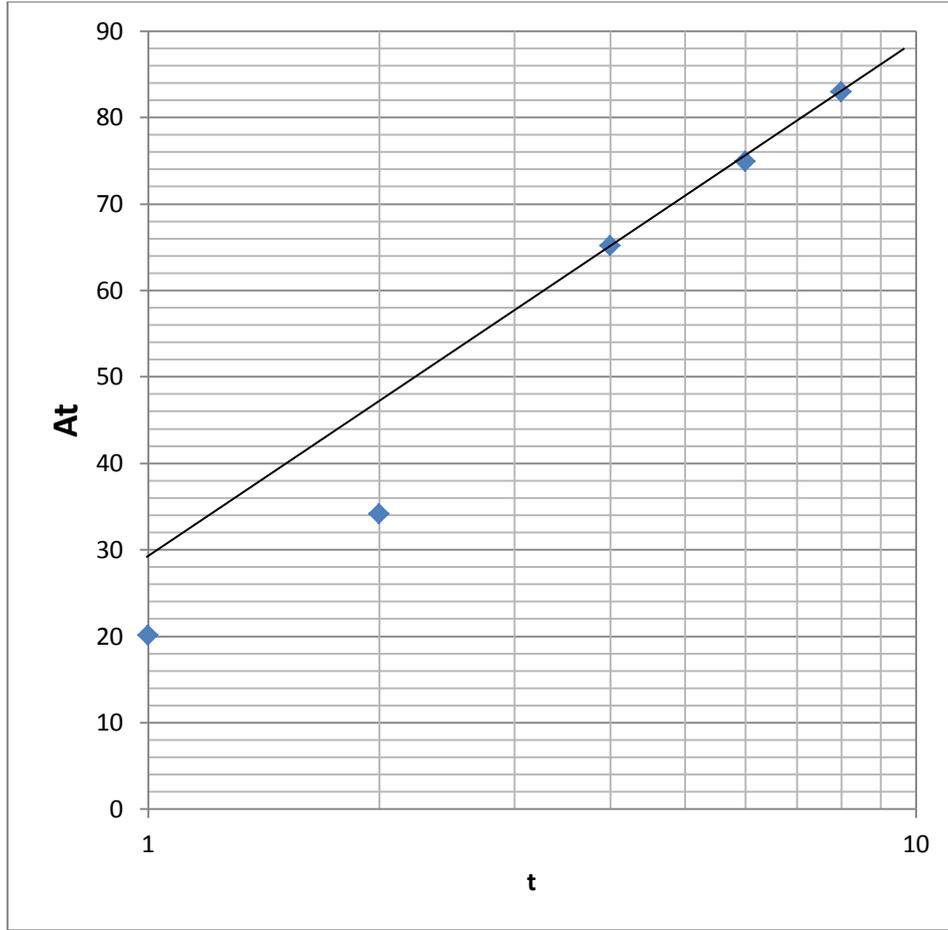
$$B_t = \frac{\sum \frac{\Delta(P^2)}{q_{sc}} \sum q_{sc}^2 - \sum q_{sc} \sum \Delta(P^2)}{N \sum q_{sc}^2 - (\sum q_{sc})^2}$$

$$B_t = \frac{(677.583)(5.368) - (4.2848)(824.1)}{4(5.368) - (4.2848)^2} = 34.11 \frac{\text{MPsia}^2}{\text{MMscfd}}$$

$$F = \frac{N \sum \Delta(P^2) - \sum q_{sc} \sum \frac{\Delta(P^2)}{q_{sc}}}{N \sum q_{sc}^2 - (\sum q_{sc})^2}$$

$$F = \frac{4(824.1) - (4.2848)(677.583)}{4(5.368) - (4.2848)^2} = 126.30 \frac{\text{MPsia}^2}{\text{MMscfd}}$$

يتم رسم القيم المحسوبة لـ (A_t) مقابل الزمن على ورق نصف لوغاريتمي ، كما في الشكل التالي:



ميل الخط (58.7) وقد تم الحصول برسم خط مستقيم يمر من النقاط الثلاثة الاخيرة والتقاطع عند $t=1$ hr (مع محور العينات) يساوي 29.5

$$K = \frac{1637.T.\mu.z}{m.h} = \frac{1637(528)(0.0116)(0.972)}{(58.7)(12)} = 13.8 \text{ md}$$

يتك ايجاد قيمة (S) من معادلة (B_t) وذلك باستخدام (B_t) عند $(t=1)$:

$$S = \left[\frac{B_{(1)}}{m} - \log \frac{k(1)}{\phi\mu Cr_w^2} + 3.23 \right] \left(\frac{1}{0.869} \right)$$

$$S = \left[\frac{29.5}{58.7} - \log \left(\frac{13.8(1)}{0.23(0.0116)(0.00109)(0.23)^2} \right) + 3.23 \right] (1.151) = -4.22$$

حساب معامل الاضطراب (D) كما يلي:

$$D = \frac{F}{0.869 \times m} = \frac{119.07}{0.869 \times 58.7} = 2.23 \text{ MMscfd}^{-1}$$

حساب (B) كما يلي:

$$B = 2m \left[\log \left(\frac{0.472r_e}{r_w} \right) + \frac{S}{2.303} \right]$$

$$B = 2(58.7) \left[\log \left(\frac{0.472(2000)}{0.23} \right) + \frac{(-4.22)}{2.303} = 209 \frac{Psia^2}{Mscfd} \right]$$

وتكون المعادلة الثنائية الحد لتصريف البئر هي:

$$\bar{P}_R^2 - P_{wf}^2 = 209 q + 0.1191 q^2$$

حيث تم اعتماد قيمة (F) عند الزمن (t=8 hr) وكانت:

$$F = 119.07 \frac{MPsia^2}{MMscfd} = 0.1191$$

حيث ان واحدة الضغط هي (Psia) وواحدة معدل الجريان هي (Mscfd).

المسألة (٢٦):

تم إجراء اختبار انخفاض الضغط لبئر غازي ، نتائج الاختبار وخصائص المكمن والمائع مبينة ادناه والمطلوب احسب (k) و (S').

$$h = 20 \text{ ft} , T = 673 \text{ }^\circ\text{R} , P_i = 3732 \text{ Psia} , \Phi = 0.1 , \mu = 0.021 \text{ cp}$$

$$r_e = 2600 \text{ ft} , r_w = 0.29 \text{ ft} , Z = 0.85 , q_{sc} = 5.65 \text{ MMscfd} , \gamma_g = 0.68$$

$$C = 2.2 \times 10^{-4} \text{ Psia}^{-1}$$

الحل:

نرسم المنحني البياني الذي يمثل ($\Delta P^2 = P_i^2 - P_{wf}^2$) مقابل ($\log t$) كما في الشكل التالي ومنه يكون الميل كما يلي:

$$m = \frac{3.7 \times 10^6 - 2.3 \times 10^6}{\log 100 - \log 10} = 1.4 \times 10^6 \frac{Psia^2}{\text{cycle}}$$

$$m = \frac{1637 q_{sc} T \bar{\mu}_g \bar{Z}}{k_g h}$$

$$K = \frac{1637 \cdot q_{sc} \cdot T \cdot \mu \cdot z}{m \cdot h} = \frac{1737(5.65 \times 10^3)(673)(0.021)(0.85)}{1.4 \times 10^6(30)} = 2.8 \text{ md}$$

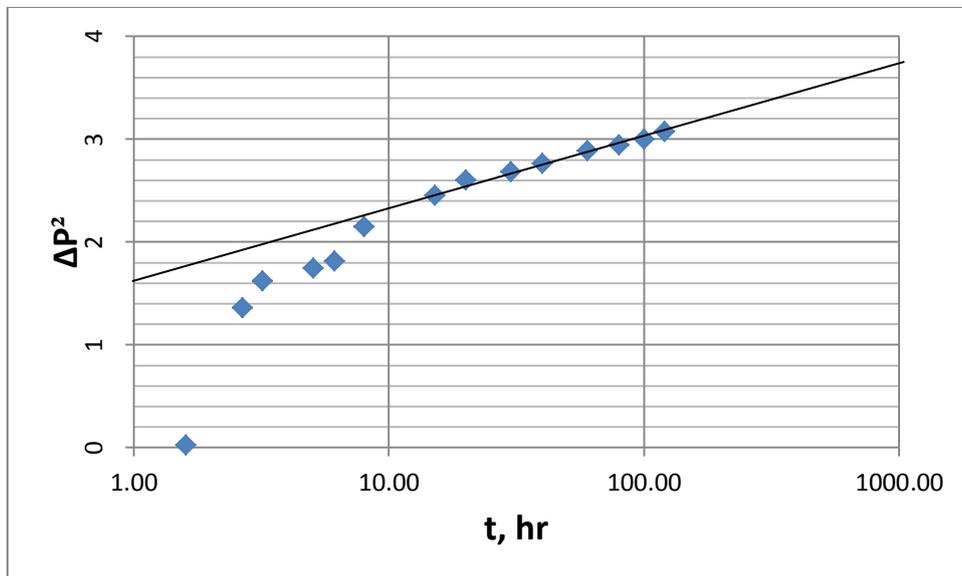
حساب معامل الظاهرة السطحية : من المنحني البياني نحصل على قيمة الضغط عند الزمن

(t=1 hr) حيث كان ($P_{1hr}^2 = 1.6 \times 10^6$) ومنه نجد :

$$S' = 1.151 \left[\frac{P_i^2 - P_{1hr}^2}{m} - \log \frac{k_g}{\phi \cdot \mu_g \cdot C_i \cdot r_w^2} + 3.23 \right]$$

$$S' = 1.151 \left[\frac{(3732)^2 - 1.6 \times 10^6}{1.4 \times 10^6} - \log \frac{2.8}{0.1 \times 0.021(2.2 \times 10^{-4})(0.29)^2} + 3.23 \right] = 4.8$$

t hr	P_{wf} Psia	(ΔP^2) MMscfd
1.60	3729	0.022
2.67	3546	1.354
3.20	3509	1.615
5.07	3491	1.741
6.13	3481	1.810
8.00	3433	2.142
15.20	3388	2.449
20.00	3366	2.598
30.13	3354	2.679
40.00	3342	2.759
60.27	3323	2.885
80.00	3315	2.939
100.27	3306	2.998
120.53	3295	3.071



المسألة (٢٧):

تم إجراء اختبار بئر غازي بطريقة استعادة الضغط ، ونتائج الاختبار وخواص الغاز والمكمن مبينة في الجدول التالي. حيث ترك البئر لينتج قبل اغلاقه.

باستخدام طريقة هورنر حدد مايلي :

$P_{ws}, Psia$	$\Delta t, hr$
1993.320	0
2029.041	0.0299
2199.561	0.0598
2443.581	0.1196
2577.351	0.1794
2625.861	0.2154
2672.901	0.3559
2701.860	0.3589
2793.441	0.4188
2874.291	0.4786
2955.141	0.5384
3006.150	0.5982
3072.741	0.6580
3116.841	0.7178
3155.061	0.7777
3195.780	0.8375
3249.435	0.9392
3319.701	1.1814
3352.041	1.4178
3360.861	1.5254
3366.741	1.6750
3372.621	1.7946
3377.031	2.0937

١- ماهو متوسط ضغط المكمن.

٢- احسب النفوذية الفعالة.

٣- احسب قيمة معامل الظاهرة السطحية.

$$q_{sc} = 7781 \text{ Mscfd} , t_p = 48 \text{ hr}$$

$$r_w = 0.2917 \text{ ft} , r_e = 4921.26 \text{ ft}$$

$$h = 29.53 \text{ ft}$$

$$\Phi = 0.065 , T = 636 \text{ }^\circ\text{R}$$

ضغط قاع البئر الجرياني قبل الاغلاق

$$P_{wf} = 1993.32 \text{ psia} \text{ هو}$$

$$\mu_g = 0.01898 \text{ cp} , Z = 0.882$$

$$C_t = 426 \cdot 10^{-6} \text{ Psia}^{-1} , \gamma_g = 0.669$$

الحل:

١- نرسم منحنى هورنر والذي يمثل (P_{ws}^2) مقابل $(\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t})$ على ورق بياني باحداثيات

نصف لوغاريتمية، أو نمثل (P_{ws}^2) مقابل $(\lg(\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}))$ على ورق بياني باحداثيات ديكارتية

لهذا يتم حساب كلا من (P_{ws}^2) و $(\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t})$ والنتائج مبينة بالجدول التالي:

لتعيين قيمة متوسط ضغط المكمن (\bar{P}_R) نمدد الجزء المستقيم من المنحني المذكور سابقاً

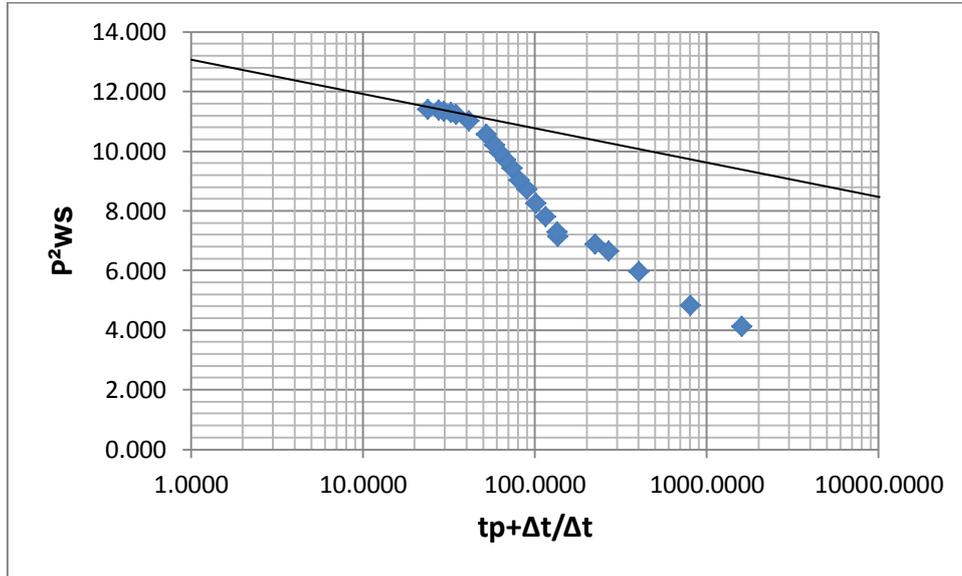
حتى يقطع محور الضغط، و هذه القيمة يمكن اعتبارها بتقريب مقبول مساوية لمربع

متوسط ضغط المكمن.

من المنحني البياني المذكور وجدنا ان مربع متوسط ضغط المكمن يساوي (13×10^6)

ومنه يكون متوسط ضغط المكمن (3606 Psia).

$\Delta t, hr$	$P_{ws} \text{ , } P_{sia}$	$(t_p + \Delta t) / \Delta t$	$P_{ws}^2 \times 10^{-6}$
0	1993.320	—	
0.0299	2029.041	1605.4568	4.11701
0.0598	2199.561	803.2284	4.83807
0.1196	2443.581	402.2073	5.97109
0.1794	2577.351	268.4923	6.64274
0.2154	2625.861	223.8815	6.89515
0.3559	2672.901	135.8525	7.14440
0.3589	2701.860	134.7358	7.30005
0.4188	2793.441	115.6269	7.80331
0.4786	2874.291	101.3018	8.26155
0.5384	2955.141	90.1549	8.73286
0.5982	3006.150	81.2415	9.03694
0.6580	3072.741	73.9452	9.44174
0.7178	3116.841	67.8731	9.71470
0.7777	3155.061	62.7231	9.95441
0.8375	3195.780	58.3134	10.21301
0.9392	3249.435	52.1091	10.55883
1.1814	3319.701	41.6282	11.02041
1.4178	3352.041	34.8565	11.23618
1.5254	3360.861	32.4668	11.29539
1.6750	3366.741	29.6572	11.33494
1.7946	3372.621	27.7467	11.37457
2.0937	3377.031	23.9257	11.40434



٢- حساب النفوذية الفعالة :

لحسابها يجب تحديد ميل الجزء المستقيم من المنحني البياني السابق ذكره:

$$m = \frac{1637 q_{sc} \cdot T \cdot \bar{\mu}_g \cdot \bar{Z}}{K_g \cdot h}$$

$$m = \frac{(11.40434 - 11.29539) \times 10^6}{\log(23.9257) - \log(32.4668)} = 0.822 \times 10^6$$

$$k = \frac{1637q_{sc} \cdot T \cdot \bar{\mu}_g \cdot \bar{Z}}{m \cdot h} = \frac{1637(7781)(0.01898)(0.882)}{(0.822 \times 10^6)(29.53)} = 5.6 \text{ md}$$

٣- حساب معامل الظاهرة السطحية:

قيمة الضغط عند الزمن (1 hr) أي عند $\left(\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} = \frac{48+1}{1} = 49\right)$ ، نحصل عليه من الجزء المستقيم للمنحنى البياني السابق، وكان $(P_{1hr}^2 = 11.1 \times 10^6)$ ومنه نجد:

$$(P_{1hr} = 3331.67 \text{ Psia})$$

$$S' = 1.151 \left[\frac{P_i^2 - P_{1hr}^2}{m} - \log \frac{k_g}{\phi \cdot \mu_g \cdot C_t \cdot r_w^2} + 3.23 \right]$$

$$S' = 1.151 \left[\frac{(3606^2) - (3331.67^2)}{0.822 \times 10^6} - \log \frac{5.6}{0.065 \times 0.01898 \times 426 \times 10^{-6} \times 0.2917^2} + 3.23 \right] = 3.23$$

$$S = S' - Dq_{sc}$$

$$D = \frac{5.18 \times 10^{-5} \gamma_g}{\mu_g \cdot h \cdot r_w \cdot K_g^{0.2}}$$

$$D = \frac{5.18 \times 10^{-5} \times 0.669}{0.01898 \times 29.53 \times 0.2917 \times 8.8^{0.2}} = 0.00014$$

$$S = (3.23) - 0.00014 \times 7782 = 2.2$$

المسألة (٢٨):

باستخدام بيانات المسألة رقم (٢٧) وباستخدام طريقة الضغط الزائف للغاز الحقيقي احسب:

١- حدد متوسط ضغط المكن.

٢- النفوذية الفعالة.

٣- معامل الظاهرة السطحية.

الحل:

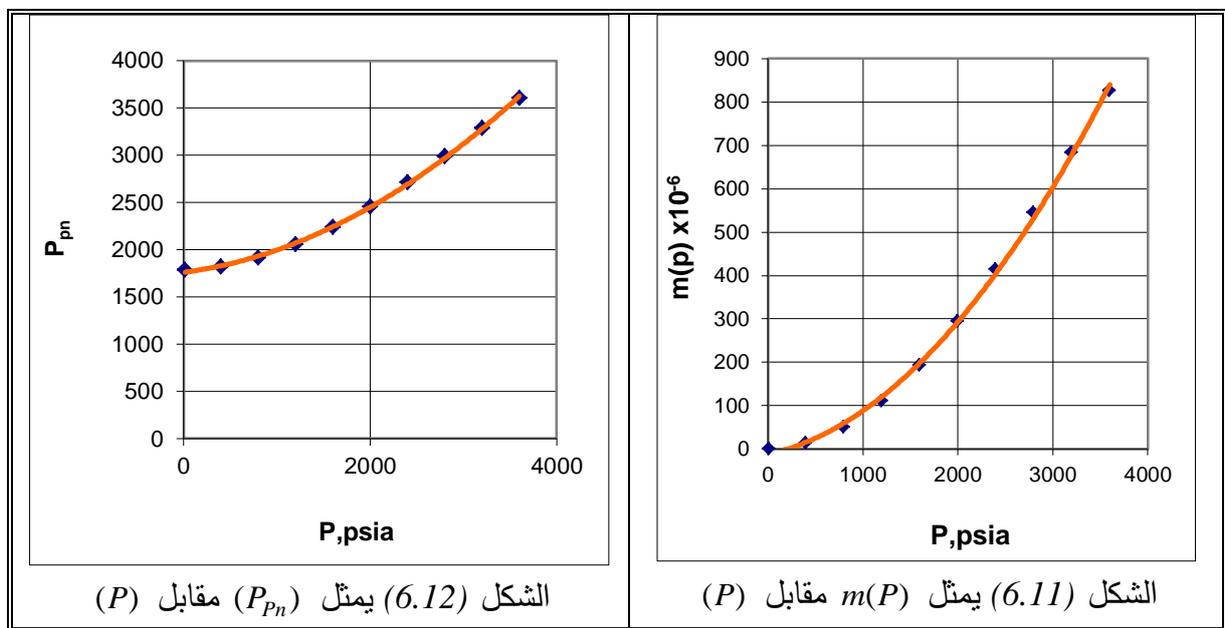
يتم حساب قيم الضغط الزائف المقابلة لقيم الضغط الحقيقي للغاز باستخدام المعادلة التالية:

$$m(P) = 2 \sum_{i=2}^n \left(\frac{\bar{P}}{\mu_g \cdot Z} \right) \Delta P \quad (2.43)$$

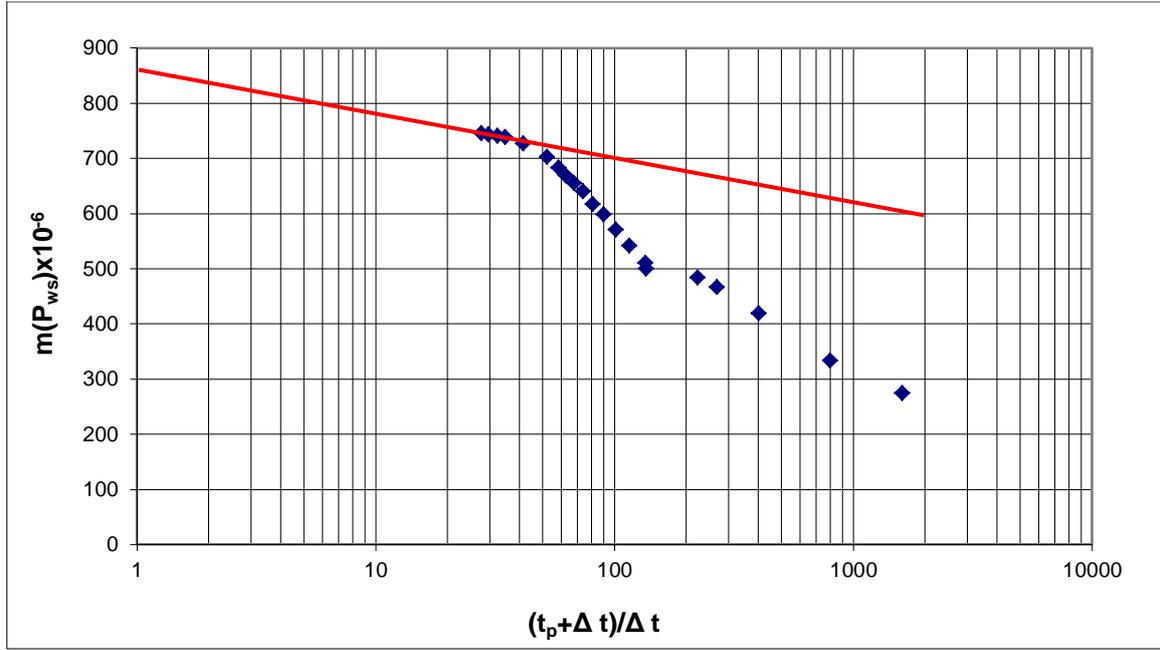
ثم يتم رسم المنحنى الذي يمثل $m(p)$ مقابل (p) ومنه حصلنا على العلاقة بين $m(p)$ و (p)

$$m(p) = (0.3509 p - 438.23) \times 10^6$$

$P, Psia$	μ, cp	Z	$2P / \mu.Z$	ΔP	$2\bar{P} / \mu.Z$	$\frac{2\bar{P}}{\mu.Z} \times \Delta P$	$m(p) = \sum \left(\frac{2\bar{P}}{\mu.Z} \right) \times \Delta P$	$m(p) \times 10^{-6}$ $Psia^2 / cp$
14.7	0.01294	0.999	2274.299	385.3	1137.150	438143.708	438143.708	0.4381
400	0.01326	0.968	62326.266	400	32300.282	12920112.913	13358256.621	13.3583
800	0.01381	0.939	123384.530	400	92855.398	37142159.147	50500415.768	50.5004
1200	0.01453	0.915	180519.670	400	151952.101	60780840.241	111281256.009	111.2813
1600	0.01544	0.897	231052.270	400	205785.970	82314388.161	193595644.169	193.5956
2000	0.01650	0.884	274235.570	400	252643.919	101057567.631	294653211.800	294.6532
2400	0.01690	0.88	322754.170	400	298494.869	119397947.452	414051159.252	414.0512
2800	0.01900	0.882	334168.760	400	328461.462	131384584.826	545435744.078	545.4357
3200	0.02036	0.892	352401.170	400	343284.964	137313985.743	682749729.822	682.7497
3600	0.02176	0.907	364809.650	400	358605.412	143442164.785	826191894.607	826.1919



يتم رسم المنحني الذي يمثل العلاقة بين $m(p)$ و $\left(\frac{t_{p+\Delta t}}{\Delta t} \right)$ على ورقة بيانية باحداثيات نصف لوغاريتمية، ثم نصل بين النقاط الاخيرة التي تقع على استقامة واحدة بخط مستقيم ونمدده حتى يقطع محور $m(p)$ ، حيث ان نقطة التقاط تمثل $(m(P_R))$ كما هو مبين بالشكل التالي:



وكانت النتائج كما يلي:

$m(\bar{P}_R) = 862 \times 10^6 \text{ Psia}^2 / cp$: قيمة الضغط الزائف المقابلة لقيمة متوسط ضغط المكمن وكانت:

$\bar{P}_R = 3705 \text{ Psia}$: قيمة متوسط ضغط المكمن وكانت:

$m(P_{1hr}) = 724 \times 10^6 \text{ Psia}^2 / cp$: قيمة الضغط الزائف عند الزمن $(\Delta t = 0)$ كانت:

$m = 43 \text{ Psia}^2 / cp \cdot \log \text{ cycle}$: ميل الجزء المستقيم من منحنى استعادة الضغط هو:

$m(P_{wf}) = 261.226 \times 10^6 \dots \text{ Psia}^2 / cp$: قيمة الضغط الزائف المقابلة لقيمة ضغط قاع البئر الجرياني:

$Z = 0.912$: قيمة عامل انضغاط الغاز عند متوسط ضغط المكمن كانت:

$\mu_g = 0.02213 \text{ cp}$: قيمة لزوجة الغاز عند متوسط ضغط المكمن كانت:

$C_g = 3 \times 10^{-4} \text{ Psia}^{-1}$: قيمة انضغاطية الغاز عند متوسط ضغط المكمن كانت:

$C_R = 15 \times 10^{-6} \text{ Psia}^{-1}$: قيمة انضغاطية صخر المكمن عند متوسط ضغط المكمن كانت:

$C_w = 11 \times 10^{-6} \text{ Psia}^{-1}$: قيمة انضغاطية الماء عند متوسط ضغط المكمن كانت:

$C_t = 325 \times 10^{-6} \text{ Psia}^{-1}$: قيمة الانضغاطية الكلية عند متوسط ضغط المكمن كانت:

$B_g = 44.2 \times 10^{-4}$: قيمة عامل حجم الغاز عند متوسط ضغط المكمن كانت:

$\rho_g = 185.1 \text{ kg/m}^3$: قيمة كثافة الغاز عند متوسط ضغط المكمن كانت:

٢- حساب النفوذية الفعالة:

$$m = \frac{1637 q_{sc} \cdot T \cdot \bar{\mu}_g \cdot \bar{Z}}{K_g \cdot h}$$

$$m = \frac{(736.77 - 741.096) \times 10^6}{\log(23.9257) - \log(32.4668)} = 43 \times 10^6$$

$$k = \frac{1637q_{sc} \cdot T \cdot \bar{\mu}_g \cdot \bar{Z}}{m \cdot h} = \frac{1637(7781)(636)(0.02213)(0.912)}{(43 \times 10^6)(29.53)} = 0.13 \text{ md}$$

٣- حساب معامل الظاهرة السطحية:

قيمة الضغط عند الزمن (1 hr) أي عند $\left(\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} = \frac{48+1}{1} = 49\right)$ ، نحصل عليه من الجزء المستقيم للمنحنى البياني السابق، وكان $(P_{1hr}^2 = 11.1 \times 10^6)$ ومنه نجد:

$$(P_{1hr} = 3331.67 \text{ Psia})$$

$$S' = 1.151 \left[\frac{P_i^2 - P_{1hr}^2}{m} - \log \frac{k_g}{\phi \cdot \mu_g \cdot C_t \cdot r_w^2} + 3.23 \right]$$

$$S' = 1.151 \left[\frac{(3707^2) - (3312.14^2)}{43 \times 10^6} - \log \frac{0.13}{0.065 \times 0.02213 \times 325 \times 10^{-6} \times 0.2917^2} + 3.23 \right] = -3.7$$

$$D = \frac{5.18 \times 10^{-5} \gamma_g}{\mu_g \cdot h \cdot r_w \cdot K_g^{0.2}}$$

$$D = \frac{5.18 \times 10^{-5} \times 0.669}{0.02213 \times 29.53 \times 0.2917 \times 0.13^{0.2}} = 0.00014$$

$$S = S' - Dq_{sc} = -3.7 - 0.00014 \times 7781 = -4.8$$

مسائل الفصل الرابع

المسألة (٢٩)

١- احسب الاحتياطي الجيولوجي (الغاز الأولي المتواجد في المكمن) لمكمن غازي مغلق، إذا علمت ان ضغط المكمن قد انخفض إلى القيمة (2900 Psia) من القيمة الأولية للضغط وهي (3000 Psia) بعد انتاج (500 MMscfd) ، حيث ان درجة حرارة المكمن (175 °F) والوزن النوعي للغاز هو (0.6) والمطلوب:

٢- إذا كانت قيمة الضغط غير صحيحة وكانت يجب ان تكون (2800 Psia) بدلا من (2900 Psia) ما هي القيمة الصحيحة للاحتياطي الجيولوجي وما هي النسبة المئوية للخطأ.

الحل :

١- من المنحنيات () نجد انه :

عند قيمة الضغط (3000 Psia) ودرجة الحرارة (175 °F) كانت قيمة معامل انضغاط الغاز (0.88) (0.87)

وعند قيمة الضغط (2900 Psia) ودرجة الحرارة (175 °F) كانت قيمة معامل انضغاط الغاز (0.87)

وعند قيمة الضغط (2800 Psia) ودرجة الحرارة (175 °F) كانت قيمة معامل انضغاط الغاز (0.87)

$$B_g = 0.0283 \frac{Z.T}{P} (ftt^3 / scf)$$

$$B_{gi} = 0.00504 \frac{Z.T}{P} (bbl/scf) = \frac{0.00504 \times 0.88 \times (175 + 460)}{3000} = 0.00094$$

هذه المعادلة هي بواحدات (bbl/scf) والمعادلة الأولى هي بواحدات (cu ft/scf) والفرق بينهما هو (5,615 cu ft/bbl)

$$B_{g2900} = 0.00504 \frac{Z.T}{P} (bbl/scf) = \frac{0.00504 \times 0.87 \times (175 + 460)}{2900} = 0.00096$$

يحسب الاحتياطي الجيولوجي من العلاقة التالية:

$$R_f = \frac{G_P}{G} = \left(\frac{B_g - B_{gi}}{B_g} \right) \rightarrow G = \frac{G_P B_g}{B_g - B_{gi}}$$

$$G = \frac{(500 \times 10^6)(0.00096)}{0.00096 - 0.00094} = 24 \times 10^9 scf$$

٢- إذا كانت قيمة الضغط الصحيحة هي (2800 Psia) عندها يكون الاحتياطي الجيولوجي هو:

$$B_{g2900} = \frac{0.00504 \times 0.87 \times (175 + 460)}{2800} = 0.000993$$

$$G = \frac{(500 \times 10^6)(0.000993)}{0.000993 - 0.00094} = 9.4632 \times 10^9 scf$$

نسبة الخطأ هي:

$$\text{error \%} = \frac{24 \times 10^9}{9.4632 \times 10^9} = 2.5$$

نلاحظ انه إذا كان الخطأ في قيمة الضغط هو (100 Psia) فان قيمة الاحتياطي ستكون اكبر من القيمة الحقيقية بمقدار (2.5) ضعف.

المسألة (30):

احسب الاحتياطي الجيولوجي بالطريقة الحجمية لمكمن غاز جاف، بيانات المكمن التالية تم تحديدها من الخرائط التحت سطحية وتحليل العينات الاسطوانية واختبار الآبار، كما تم الحصول على عينات المائع من عدة ابار ، استخدم هذه البيانات لتحديد حجم الغاز الجاف في المكمن (الاحتياطي الجيولوجي).

$$P_i = 2500 \text{ Psia} , A = 1000 \text{ acres} , T = 180 \text{ }^\circ\text{F} , \Phi = 20\%$$

$$S_{wi} = 25\% , h = 10 \text{ ft} , Z_i = 0.86$$

الحل:

$$B_g = 0.0283 \frac{Z.T}{P} (\text{ft}^3 / \text{scf})$$

$$B_{gi} = \frac{0.0283 \times 0.86 \times 640}{2500} = 0.00623$$

$$G = \frac{43560 \times A \times h \times \Phi (1 - S_{wi})}{B_{gi}} = \frac{43560 \times 1000 \times 0.2 (180 + 460)}{0.00623}$$

$$= 894.973 \times 10^9 \text{ scf} = B_{scf}$$

المسألة (31):

مكمن غازي ذو دفع مائي، خصائص المكمن والموائع هي كما يلي:

$$A = 8870 \text{ acres} , T = 155 \text{ }^\circ\text{F} , \Phi = 30.8\%$$

$$S_{wi} = 42.5\% , h = 32.5 \text{ ft} , Z_{SC} = 1$$

بيانات الادائية والقيم المقابلة لها من (B_g) و (P/Z) معطاة بالجدول التالي:

Time years	Cum. Gas Prod. G_{pr} MMMscf	Res. press Psia	Z-factor	P/Z	B_g , Res bbl/scf
0	0	2333	0.882	2645	0.006580

2	2.305	2321	0.883	2629	0.006621
4	20.257	2203	0.884	2492	0.006984
6	49.719	2028	0.888	2284	0.007621
8	80.134	1854	0.894	2074	0.008392
10	105.93	1711	0.899	1903	0.009145
12	135.35	1531	0.907	1688	0.010311
14	157.11	1418	0.912	1555	0.011194
16	178.3	1306	0.921	1418	0.012274
18	192.089	1227	0.922	1331	0.013078
20	205.744	1153	0.928	1242	0.014008

يتم حساب عامل حجم الغاز من العلاقة التالية والنتائج مبينة بالجدول السابق

$$B_g = 0.0283 \frac{ZT}{P} (ft^3 / scf)$$

١ - حساب الاحتياطي الجيولوجي بالطريقة الحجمية:

$$G = \frac{43560 \times A \times h \times \phi(1 - S_w)}{B_{gi}}$$

$$G = \frac{43560 \times 8870 \times 32.5 \times 0.308(1 - 0.425)}{0.006580} = 337.9 \times 10^9 \text{ scf}$$

$G=337.9 \text{ MMMscf}$

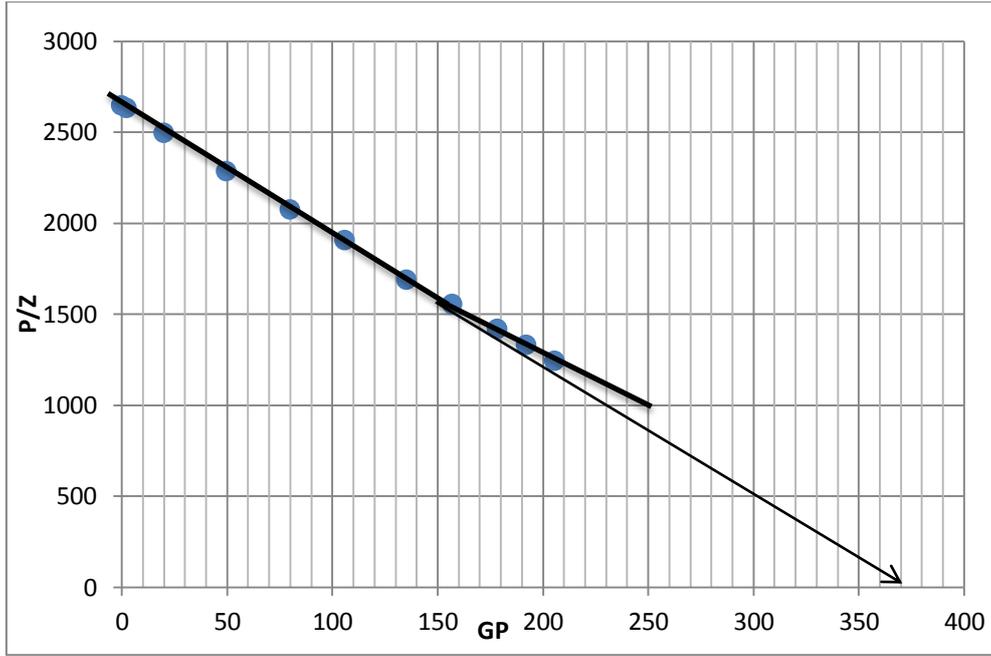
٢ - حساب الاحتياطي بطريقة الموازنة المادية:

A - بطريقة رسم منحنيات الطاقة (p/z):

نرسم المنحني الذي يمثل (P/Z) مقابل الإنتاج التراكمي (G_p) كما هو مبين بالشكل التالي: ان تصاعد المنحني في نهايته إلى الاعلى يدل على التعدي المائي، ولهذا فان طريقة (P/Z) لا يمكن استخدامها لتحديد الاحتياطي الجيولوجي (الغاز الأولي الموجود في المكمن)، ويظهر ان المنحني في العشر سنوات الأولى هو خط مستقيم .

يشير الرسم البياني بعد عشر سنوات فقط إلى انحناء ملحوظ في الخط المستقيم والذي يدل على وجود تدفق للمياه، هذا المنحني البياني يظهر بوضوح عدم الحساسية لهبوط الضغط (P/Z) ، أو نقول ان طرق الموازنة المادية عموماً تفيد في كشف للتعدي المائي في وقت مبكر من حياة المكمن الغازي.

ان تمديد الخط المستقيم الذي نهايته عند نقطة العشر سنوات (قبل حدوث التعدي المائي) سيقطع محور (G_p) بنقطة تمثل قيمة الاحتياطي الجيولوجي (G=370 MMMscf)



B - حسابات تدفق المياه على افتراض ان الاحتياطي الجيولوجي معروفا:
 افترض ان التقديرات الحجمية للاحتياطي الجيولوجي كانت صحيحة ، الكمية التراكمية للمياه المتدفقة (W_e) في نهاية الـ (٤ اعوام) يتم حسابها كما يلي:

$$W_e = G_p B_g - G (B_g - B_{gi})$$

$$W_e = (20.257)(0.006984) - 337.9(0.006984 - 0.006580)$$

$$W_e = 5 \text{ MM res ft}$$

وبنفس الطريقة يتم حساب (W_e) عند كافة الازمنة من عمر انتاج المكنم والنتائج موضحة بالجدول التالي:

Time years	G_p MMMscf	B_g Cft/scft	$G_p \times B_g$ MMCft	$B_g - B_{gi}$ Cft/scft	$(G G_p \times B_g)$ MMCft	W_e MMCft
0	0	0.006580				
2	2.305	0.006621	0.015	0.000041	0.014	0.0013
4	20.257	0.006984	0.141	0.000404	0.136	0.0050
8	80.134	0.008392	0.673	0.001812	0.612	0.0601
12	135.35	0.010311	1.396	0.003731	1.261	0.1349
16	178.3	0.012274	2.188	0.005694	1.924	0.2645

المسألة (٣٢):

تم الحصول على سجل الإنتاج التالي لمكمن غازي من النوع الحجمي ارسم المنحني الذي يمثل (P/Z) مقابل (G_p) ثم احسب الاحتياطي الجيولوجي واستنتج قيمته من المنحني البياني المذكور وحدد (P_i/Z_i) . كذلك حدد الإنتاجية التراكمية من الغاز إذا انخفض ضغط المكمن إلى (300 Psia) ، علما ان (T_f= 200 °F) و (γ_g = 0.9).

	P, Psia	Z	P/Z	G _p , Bcf
1	1620	0.787	2058	14.002
2	1205	0.828	1455	23.687
3	888	0.866	1025	31.009
4	645	0.9	717	36.207

الحل:

يتم رسم المنحني الذي يمثل (P/Z) مقابل (G_p) كما هو مبين بالشكل التالي:
بما ان النقاط جميعها تقع على مستقيم واحد هذا يؤكد ان المكمن حجمي، ويتم حساب الميل من النقط الأولى والرابعة كما يلي:

$$m = \frac{(P/Z)_1 - (P/Z)_4}{G_{p4} - G_{p1}} = \frac{2058 - 717}{36.207 - 14.002} = 61.6$$

ولإيجاد (P_i/Z_i) نستخدم المعادلة التالية وبيانات النقطة (١):

$$\frac{P}{Z} = \frac{P_i}{Z_i} - \frac{T_f P_{sc}}{T_{sc} B_{gi} \cdot G} G_p \rightarrow \frac{P_i}{Z_i} = \frac{P}{Z} + m G_p \quad (4.9)$$

$$\frac{P_i}{Z_i} = 2058 + 61.6 \times 14.002 = 2921 \text{ Psia}$$

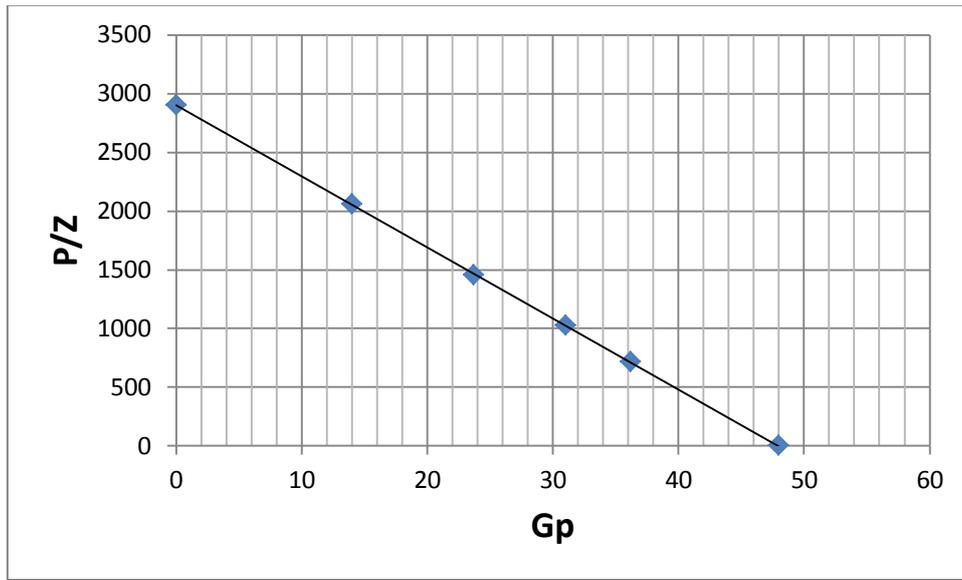
$$B_{gi} = 0.0283 \frac{T_f Z_i}{P_i} = 0.0283 \times T_f \frac{Z_i}{P_i} = 0.0283 \times 660 \times \frac{1}{2921} = 0.0064 \text{ ft}^3 \text{ scf}$$

$$G = \frac{T_f P_{sc}}{T_{sc} B_{gi} \cdot m} = \frac{(660)(14.7)}{(520)(0.0064)(61.6)} = 47.33 \text{ Bcf}$$

عند الضغط (300 psia) نجد:

$$Z = 0.949 \quad , \quad P/Z = 316 \text{ PSIA}$$

$$G_p = \frac{\left(\frac{P_i}{Z_i} - \frac{P}{Z}\right)}{m} = \frac{2921 - 316}{61.6} = 42.3 \text{ Bcf}$$



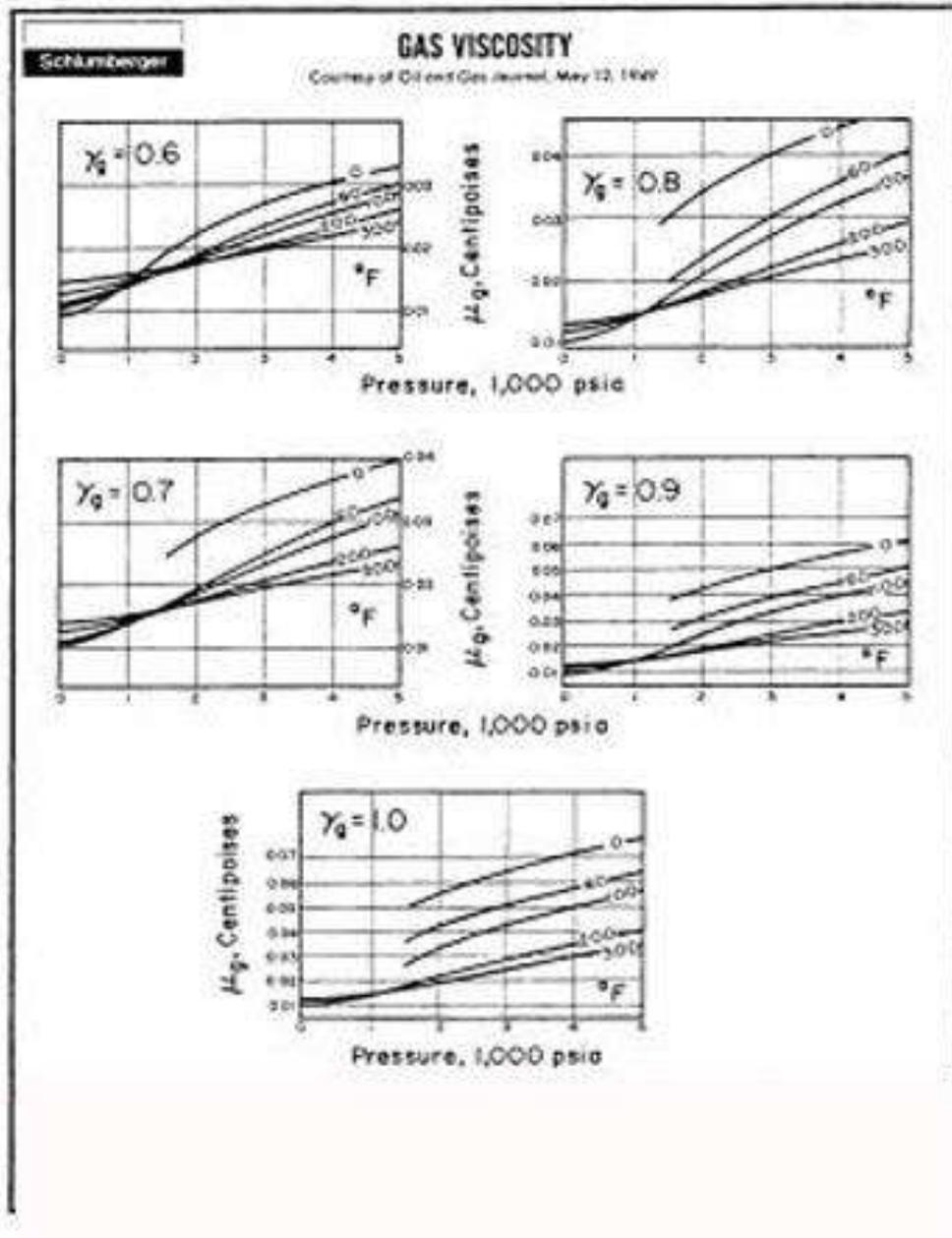
الجدول (A-1) يبين الخصائص الحرجة لبعض الغازات

Compound	Chemical Composition	Symbol (for calculations)	Molecular Weight	Critical Pressure (psi)	Critical Temp. (R)
Methane	CH ₄	C ₁	16.04	673	344
Ethane	C ₂ H ₆	C ₂	30.07	709	550
Propane	C ₃ H ₈	C ₃	44.09	618	666
iso-Butane	C ₄ H ₁₀	i-C ₄	58.12	530	733
n- Butane	C ₄ H ₁₀	n-C ₄	58.12	551	766
iso-Pentane	C ₅ H ₁₂	i-C ₅	72.15	482	830
n-Pentane	C ₅ H ₁₂	n-C ₅	72.15	485	847
n-Hexane	C ₆ H ₁₄	n-C ₆	86.17	434	915
n-Heptane	C ₇ H ₁₆	n-C ₇	100.2	397	973
n-Octane	C ₈ H ₁₈	n-C ₈	114.2	361	1024
Nitrogen	N ₂	N ₂	28.02	492	227
Carbon Dioxide	CO ₂	CO ₂	44.01	1,072	548
Hydrogen Sulfide	H ₂ S	H ₂ S	34.08	1,306	673

مثال :

عند الضغط (2000 Psia) ودرجة الحرارة (200 °F) والوزن النوعي للغاز الحقيقي (0.7) ومن المنحنيات (A-2) نجد ان لزوجة الغاز هي (0.018 CP).

الشكل (A-1) يبين منحنيات حساب لزوجة الغاز عند قيم مختلفة للوزن النوعي للغاز الطبيعي



مثال :

عند الضغط (2000 Psia) ودرجة الحرارة (200 °F) والوزن النوعي للغاز الحقيقي (0.7) ومن المنحنيات (A-) نجد ان لزوجة الغاز هي (0.018 CP).

TABLE A.1
Physical Constants of Hydrocarbons

No.	Compound	Formula	Molecular weight	Boiling point °F	Vapor pressure, 14.696 psia	100°F, psia	Freezing point, °F, 14.696 psia	Critical Constants	
								Pressure, psia	Temperature, °F
1	Methane	CH ₄	16.043	-258.69	(5000)	-296.46	667.8	-116.63	0.0991
2	Ethane	C ₂ H ₆	30.070	-127.48	(800)	-297.89	707.8	90.09	0.0788
3	Propane	C ₃ H ₈	44.097	-43.67	190.0	-305.64	616.3	206.01	0.0737
4	n-Butane	C ₄ H ₁₀	58.124	31.10	51.6	-217.05	550.7	305.65	0.0702
5	Isobutane	C ₄ H ₁₀	58.124	10.90	72.2	-255.29	529.1	274.98	0.0724
6	n-Pentane	C ₅ H ₁₂	72.151	96.92	15.570	-201.51	488.6	385.7	0.0675
7	Isopentane	C ₅ H ₁₂	72.151	82.12	20.44	-255.83	490.4	369.10	0.0679
8	Neopentane	C ₅ H ₁₂	72.151	49.10	35.9	2.17	464.0	321.13	0.0674
9	n-Hexane	C ₆ H ₁₄	86.178	155.72	4.956	-139.58	436.9	453.7	0.0681
10	2-Methylpentane	C ₆ H ₁₄	86.178	140.47	6.767	-244.63	436.6	435.83	0.0681
11	3-Methylpentane	C ₆ H ₁₄	86.178	145.89	6.098	—	453.1	448.3	0.0681
12	Neohexane	C ₆ H ₁₄	86.178	121.52	9.856	-147.72	446.8	420.13	0.0667
13	2,3-Dimethylbutane	C ₆ H ₁₄	86.178	136.36	7.404	-199.38	435.5	440.29	0.0665
14	n-Heptane	C ₇ H ₁₆	100.205	209.17	1.620	-131.05	396.8	512.8	0.0691
15	2-Methylhexane	C ₇ H ₁₆	100.205	194.09	2.271	-180.89	396.5	495.00	0.0673
16	3-Methylhexane	C ₇ H ₁₆	100.205	197.32	2.130	—	406.1	503.78	0.0646
17	3-Ethylpentane	C ₇ H ₁₆	100.205	200.25	2.012	-181.48	419.3	513.48	0.0665
18	2,2-Dimethylpentane	C ₇ H ₁₆	100.205	174.54	3.492	-190.86	402.2	477.23	0.0665
19	2,4-Dimethylpentane	C ₇ H ₁₆	100.205	176.89	3.292	-182.63	396.9	475.95	0.0668
20	3,3-Dimethylpentane	C ₇ H ₁₆	100.205	186.91	2.773	-210.01	427.2	505.85	0.0662
21	Triptane	C ₇ H ₁₆	100.205	177.58	3.374	-12.82	428.4	496.44	0.0636
22	n-Octane	C ₈ H ₁₈	114.232	258.22	0.537	-70.18	360.6	564.22	0.0690
23	Diisobutyl	C ₈ H ₁₈	114.232	228.39	1.101	-132.07	360.6	530.44	0.0676
24	Isooctane	C ₈ H ₁₈	114.232	210.63	1.708	-161.27	372.4	519.46	0.0656
25	n-Nonane	C ₉ H ₂₀	128.259	303.47	0.179	-64.28	332.0	610.66	0.0684
26	n-Decane	C ₁₀ H ₂₂	142.286	345.48	0.0597	-21.36	304.0	652.1	0.0679
27	Cyclopentane	C ₅ H ₁₀	70.135	120.65	9.914	-136.91	653.8	461.5	0.059
28	Methylcyclopentane	C ₆ H ₁₂	84.162	161.25	4.503	-224.44	499.35	499.35	0.0607
29	Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	84.162	177.29	3.264	43.77	591.0	536.7	0.0586
30	Methylcyclohexane	C ₇ H ₁₄	98.189	213.68	1.609	-195.87	503.5	570.27	0.0600
31	Ethylene	C ₂ H ₄	28.054	-154.62	—	-272.45	729.8	48.58	0.0737
32	Propene	C ₃ H ₆	42.081	-53.90	226.4	-301.45	669.0	196.9	0.0689
33	1-Butene	C ₄ H ₈	56.108	20.75	63.05	-301.63	503.0	295.6	0.0685

TABLE A.1 (Continued)

No.	Density of liquid, 60°F.		Specific gravity, 60°F/60°F	Gal/lb-mole	Coefficient of Density Temperature	Pitzer acentric factor	Compressibility factor of real gas, z	Gas density, 60°F.		Specific heat, 60°F.		
	14.696 psia	14.696 psia						14.696 psia	14.696 psia			
1	0.3	2.5	0.3564	2.971	2.962	10.12	0.0104	0.9881	0.5539	23.65	59.	0.5266
2	0.3564	2.971	0.0986	2.962	10.12	—	0.0986	0.9916	1.0382	12.62	37.5	0.4097
3	0.5077	4.233	0.5077	4.233	10.42	0.00152	0.1524	0.9820	1.5225	8.606	36.43	0.3081
4	0.5844	4.872	0.5844	4.872	11.93	0.00117	0.2010	0.9667	2.0068	6.529	31.81	0.3067
5	0.5631	4.695	0.5631	4.695	12.38	0.00119	0.1848	0.9696	2.0068	6.529	30.65	0.3072
6	0.6310	2.261	0.6310	2.261	13.71	0.00087	0.2539	0.9549	2.4911	5.260	27.67	0.3883
7	0.6247	5.208	0.6247	5.208	13.85	0.00090	0.2223	0.9544	2.4911	5.260	27.39	0.3827
8	0.5967	4.975	0.5967	4.975	14.50	0.00104	0.1969	0.9510	2.4911	5.260	26.17	0.3866
9	0.6640	5.536	0.6640	5.536	15.57	0.00075	0.3007	—	2.9753	4.404	24.38	0.3864
10	0.6579	5.495	0.6579	5.495	15.71	0.00073	0.2825	—	2.9753	4.404	24.15	0.3872
11	0.6689	5.577	0.6689	5.577	15.45	0.00075	0.2741	—	2.9753	4.404	24.56	0.3815
12	0.6540	5.453	0.6540	5.453	15.81	0.00078	0.2369	—	2.9753	4.404	24.01	0.3809
13	0.6664	5.556	0.6664	5.556	15.51	0.00075	0.2495	—	2.9753	4.404	24.47	0.378
14	0.6882	5.738	0.6882	5.738	17.46	0.00069	0.3498	—	3.4596	3.787	21.73	0.3475
15	0.6830	5.694	0.6830	5.694	17.60	0.00068	0.3336	—	3.4596	3.787	21.57	0.3390
16	0.6917	5.767	0.6917	5.767	17.38	0.00069	0.3257	—	3.4596	3.787	21.84	0.3390
17	0.7028	5.859	0.7028	5.859	17.10	0.00070	0.3095	—	3.4596	3.787	22.19	0.3390
18	0.6782	5.654	0.6782	5.654	17.72	0.00072	0.2998	—	3.4596	3.787	21.41	0.3395
19	0.6773	5.647	0.6773	5.647	17.75	0.00072	0.3048	—	3.4596	3.787	21.39	0.3390
20	0.6976	5.816	0.6976	5.816	17.23	0.00065	0.2840	—	3.4596	3.787	22.03	0.3395
21	0.6946	5.791	0.6946	5.791	17.30	0.00069	0.2568	—	3.4596	3.787	21.93	0.3612
22	0.7068	5.893	0.7068	5.893	19.39	0.00062	0.4010	—	3.9439	3.322	19.50	0.3876
23	0.6979	5.819	0.6979	5.819	19.63	0.00065	0.3596	—	3.9439	3.322	19.33	0.3733
24	0.6962	5.804	0.6962	5.804	19.68	0.00065	0.3041	—	3.9439	3.322	19.28	0.3758
25	0.7217	6.017	0.7217	6.017	21.32	0.00063	0.4455	—	4.4282	2.959	17.80	0.3940
26	0.7342	6.121	0.7342	6.121	23.24	0.00055	0.4885	—	4.9125	2.667	16.33	0.3635
27	0.7504	6.256	0.7504	6.256	24.21	0.00070	0.1955	0.9657	2.4215	5.411	33.85	0.2712
28	0.7536	6.283	0.7536	6.283	24.40	0.00071	0.2306	—	2.9057	4.509	28.33	0.3010
29	0.7834	6.531	0.7834	6.531	28.89	0.00066	0.2133	—	2.9057	4.509	29.45	0.2900
30	0.7740	6.453	0.7740	6.453	28.89	0.00063	0.2567	—	3.3900	3.865	24.94	0.3170
31	—	—	—	—	—	—	0.0868	0.9938	0.9606	13.53	—	0.3622
32	0.5220	4.352	0.5220	4.352	9.67	0.00189	0.1405	0.9844	1.4529	49.018	39.25	0.585
33	0.6013	5.013	0.6013	5.013	11.19	0.00116	0.1906	0.9704	1.9372	6.764	33.91	0.3548

(Continued)

TABLE A.1
Physical Constants of Hydrocarbons

No.	Compound	Formula	Molecular weight	Boiling point °F, 14.696 psia	Vapor pressure, 100°F, psia	Freezing point, °F, 14.696 psia	Pressure, psia	Temperature, °F	Critical Constants
34	Cis-2-Butene	C ₄ H ₈	56.108	38.69	45.54	-218.06	610.0	324.37	0.0668
35	Trans-2-Butene	C ₄ H ₈	56.108	33.58	49.80	-157.96	595.0	311.86	0.0680
36	Isobutene	C ₄ H ₈	56.108	19.59	63.40	-220.61	580.0	292.55	0.0682
37	1-Pentene	C ₅ H ₁₀	70.135	85.93	19.115	-265.39	590.0	376.93	0.0697
38	1,2-Butadiene	C ₄ H ₆	54.092	51.53	(20.)	-213.16	(653.)	(339.)	(0.0649)
39	1,3-Butadiene	C ₄ H ₆	54.092	24.06	(60.)	-164.02	628.0	306.0	0.0654
40	Isoprene	C ₅ H ₈	68.119	93.30	16.672	-230.74	(558.4)	(412.)	(0.0650)
41	Acetylene	C ₂ H ₂	26.038	-119	—	-114.	890.4	95.31	0.0695
42	Benzene	C ₆ H ₆	78.114	176.17	3.224	41.96	710.4	552.22	0.0531
43	Toluene	C ₇ H ₈	92.141	231.13	1.032	-136.94	595.9	605.55	0.0549
44	Ethylbenzene	C ₈ H ₁₀	106.168	227.16	0.371	-138.91	523.5	651.24	0.0564
45	o-Xylene	C ₈ H ₁₀	106.168	291.97	0.264	-13.30	541.4	675.0	0.0557
46	m-Xylene	C ₈ H ₁₀	106.168	282.41	0.326	-54.12	513.6	651.02	0.0567
47	p-Xylene	C ₈ H ₁₀	106.168	281.05	0.347	55.86	509.2	649.6	0.0572
48	Styrene	C ₈ H ₈	104.152	293.29	(0.24)	-23.10	580.0	706.0	0.0541
49	Isopropylbenzene	C ₉ H ₁₂	120.195	306.34	0.188	-140.82	465.4	676.4	0.0570
50	Methyl alcohol	CH ₄ O	32.042	148.1	4.63	-143.82	1174.2	462.97	0.0589
51	Ethyl alcohol	C ₂ H ₆ O	46.069	172.92	2.3	-173.4	925.3	469.58	0.0580
52	Carbon monoxide	CO	28.010	-313.6	—	-340.6	507.	-220.	0.0532
53	Carbon dioxide	CO ₂	44.010	-109.3	—	—	1071.	87.9	0.0342
54	Hydrogen sulfide	H ₂ S	34.076	-76.6	394.0	-117.2	1306.	212.7	0.0459
55	Sulfur dioxide	SO ₂	64.059	14.0	88.	-103.9	1145.	315.5	0.0306
56	Ammonia	NH ₃	17.031	-28.2	212.	-107.9	1636.	270.3	0.0681
57	Air	N ₂ O ₂	28.964	-317.6	—	547.	-221.3	0.0517	—
58	Hydrogen	H ₂	2.016	-423.0	—	-434.8	188.1	-399.8	0.05167
59	Oxygen	O ₂	31.999	-297.4	—	-361.8	736.9	-181.1	0.0382
60	Nitrogen	N ₂	28.013	-320.4	—	-346.0	493.0	-232.4	0.0514
61	Chlorine	Cl ₂	70.906	-29.3	158.	-149.8	1118.4	291.	0.0281
62	Water	H ₂ O	18.015	212.0	0.9492	32.0	3208.	705.6	0.0500
63	Helium	He	4.003	—	—	—	—	—	—
64	Hydrogen chloride	HCl	36.461	-121.	925.	-173.6	1198.	124.5	0.0208

Source: Courtesy of GPSA.

TABLE A.1 (Continued)

No.	Density of liquid, 60°F, 14.696 psia		Gas density, 60°F, 14.696 psia		Specific heat 60°F, 14.696 psia							
	(lb/gal (Wt in vacuum))	(lb/gal (Wt in air))	Cu ft gas/lb	Cu ft gas/gal liquid								
Compressibility factor of real gas, z	Pitzer acentric factor	Coefficient of Density	Temperature Gall/mole	Specific gravity Air = 1	Cp. Btu/lb °F							
						Ideal gas	Liquid					
34	0.6271	5.228	5.219	10.73	0.00098	0.1953	0.9661	1.9372	6.764	35.36	0.3269	0.5271
35	0.6100	5.086	5.076	11.03	0.00107	0.2220	0.9662	1.9372	6.764	34.40	0.3654	0.5351
36	0.6004	5.006	4.996	11.21	0.00120	0.1951	0.9689	1.9372	6.764	33.86	0.3701	0.549
37	0.6457	5.383	5.374	13.03	0.00089	0.2925	0.9550	2.4215	5.411	29.13	0.3635	0.5196
38	0.658	5.486	5.470	9.86	0.00098	0.2485	(0.969)	1.8676	7.016	38.49	0.3458	0.5408
39	0.6272	5.229	5.220	10.34	0.00113	0.1955	(0.965)	1.8676	7.016	36.69	0.3412	0.5079
40	0.6851	5.720	5.711	11.91	0.00086	0.2323	(0.962)	2.3519	5.571	31.87	0.357	0.5192
41	0.615	—	—	—	—	0.1803	0.9925	0.8990	14.57	—	—	0.3966
42	0.8844	7.373	7.365	10.59	0.00066	0.2125	0.929	2.6962	4.858	35.82	0.2429	0.4098
43	0.8718	7.268	7.260	12.88	0.00060	0.2596	0.903	3.1812	4.119	29.94	0.2598	0.4012
44	0.8718	7.268	7.259	14.61	0.00054	0.3169	—	3.6655	3.574	25.98	0.2795	0.4114
45	0.8848	7.377	7.367	14.39	0.00055	0.3023	—	3.6655	3.574	26.37	0.2914	0.4418
46	0.8687	7.243	7.234	14.66	0.00054	0.3278	—	3.6655	3.574	25.89	0.2782	0.4045
47	0.8657	7.218	7.209	14.71	0.00054	0.3138	—	3.6655	3.574	25.80	0.2769	0.4083
48	0.9110	7.595	7.586	13.71	0.00057	—	—	3.9599	3.644	27.67	0.2711	0.4122
49	0.8663	7.223	7.214	16.64	0.00054	0.2862	—	4.1498	3.157	22.80	0.2917	(0.414)
50	0.796	6.64	6.63	4.83	—	—	—	1.1063	11.84	78.6	0.3231	0.594
51	0.794	6.62	6.61	6.96	—	—	—	1.5906	8.237	54.5	0.3323	0.562
52	0.801	6.68	6.67	4.19	—	0.041	0.9995	0.9671	13.55	—	0.2484	—
53	0.827	6.89	6.88	6.38	—	0.225	0.9943	1.5195	8.623	59.5	0.1991	—
54	0.79	6.59	6.58	5.17	—	0.100	0.9903	1.1765	11.14	73.3	0.238	—
55	1.397	11.65	11.64	5.50	—	0.246	—	2.2117	5.924	69.0	0.145	0.325
56	0.6173	5.15	5.14	3.31	—	0.255	—	0.5860	22.28	114.7	0.5002	1.114
57	0.856	7.14	7.13	4.06	—	—	0.9996	1.0000	13.10	—	0.2400	—
58	0.07	—	—	—	—	0.000	1.0006	0.0696	188.2	—	3.408	—
59	1.14	9.50	9.49	3.37	—	0.0213	—	1.1048	11.86	—	0.2188	—
60	0.808	6.74	6.73	4.16	—	0.040	0.9997	0.9672	13.55	—	0.2482	—
61	1.414	11.79	11.78	6.01	—	—	—	2.4481	5.352	63.1	0.119	—
62	1.000	8.337	8.328	2.16	—	0.348	—	0.6220	21.06	175.6	0.4446	1.0009
63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
64	0.8558	7.135	7.126	5.11	0.00335	—	—	1.2588	10.41	74.3	0.190	—

Source: Courtesy of GPSA.

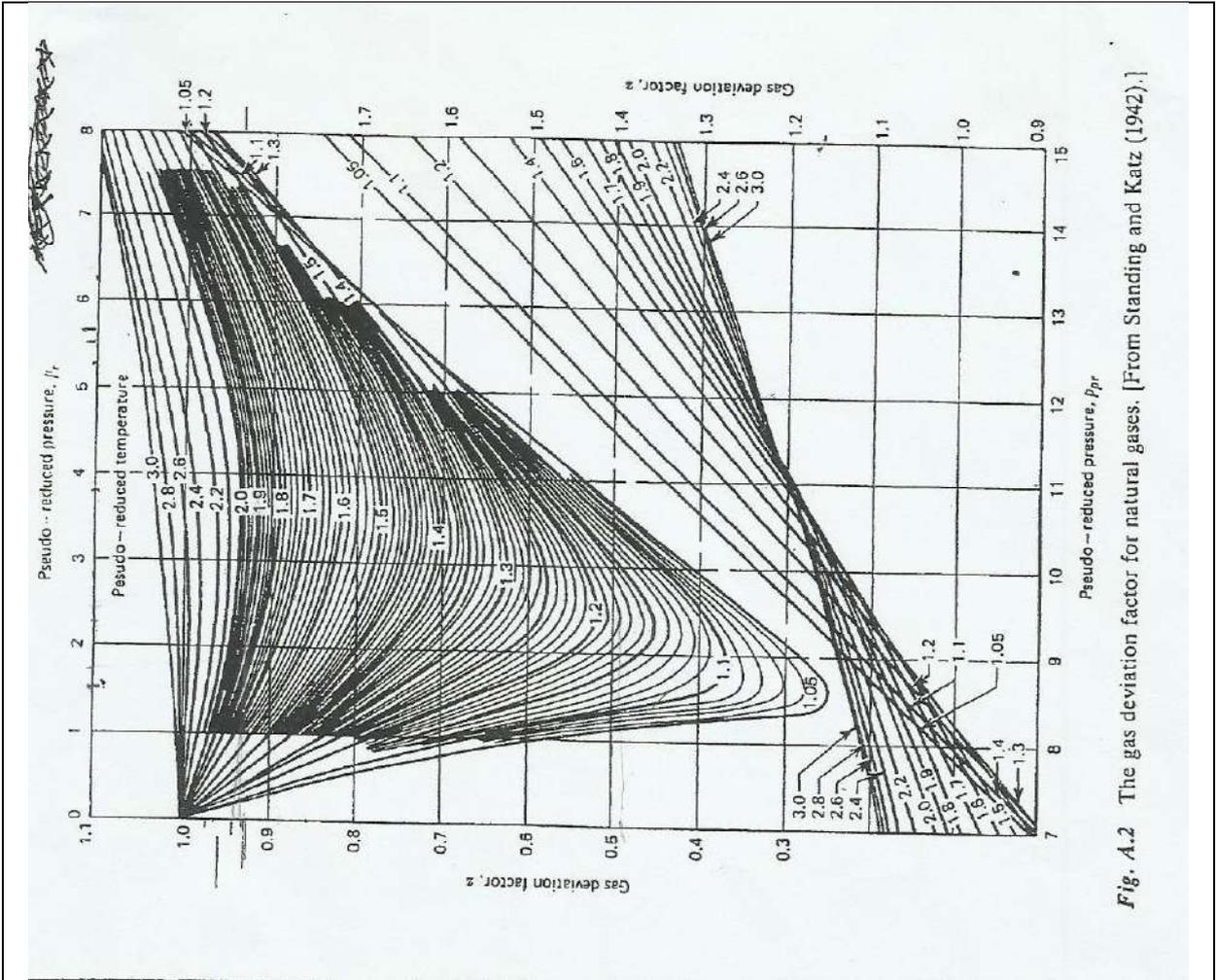


Fig. A.2 The gas deviation factor for natural gases. [From Standing and Katz (1942).]

الشكل (A-2) عوامل الانضغاطية للغازات الحقيقية

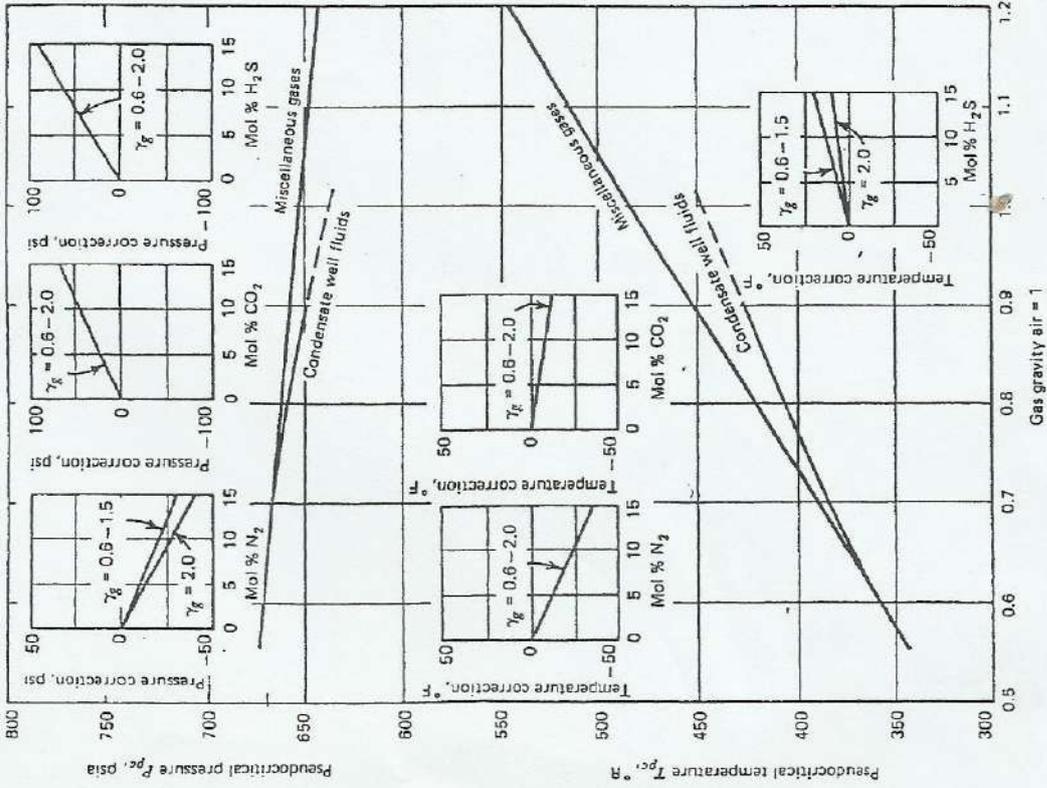


Fig. A.1 Pseudocritical properties of miscellaneous natural gases. [From Brown, Katz, Oberfell and Alden (1948); inserts from Carr, Kobayashi and Burrows (1954).]

الشكل (A-3) الخصائص الحرجة للغاز الحقيقي

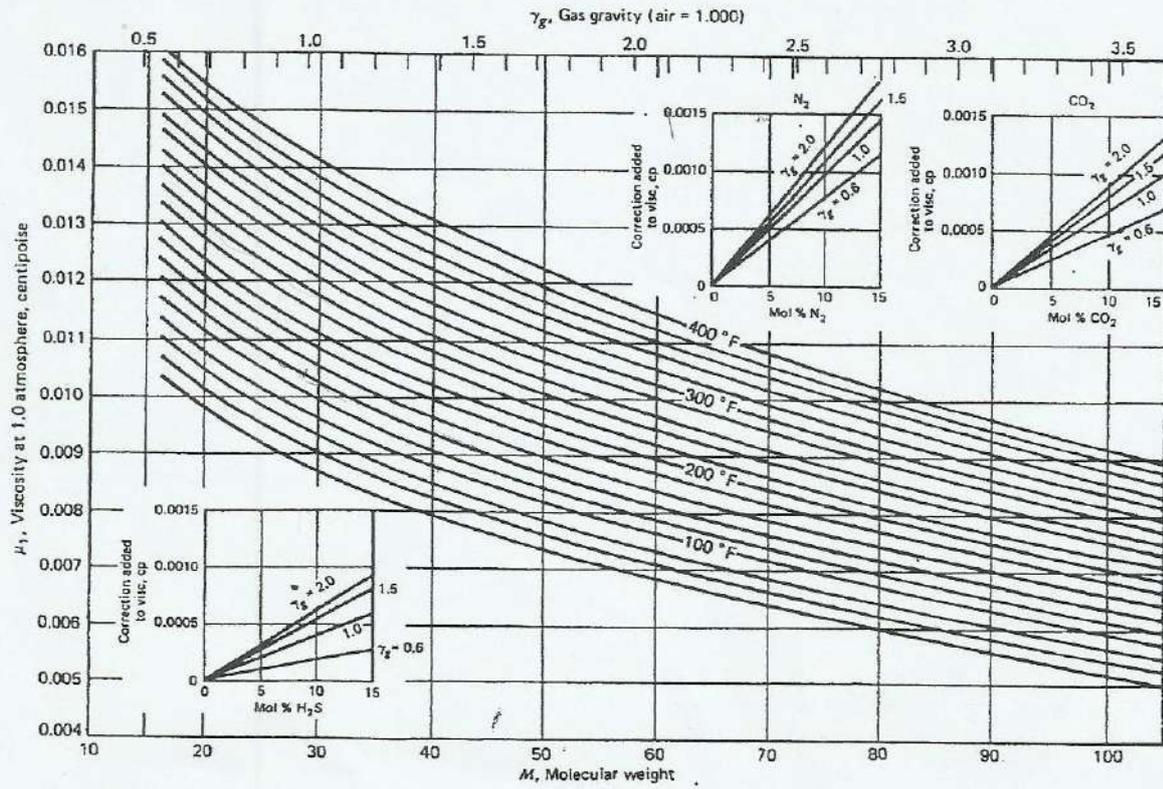


Fig. A.17 Viscosity of paraffin hydrocarbon gases at 1.0 atmosphere. [From Carr, Kobayashi and Burrows (1954).]

الشكل (A-4) لزوجة الغازات الطبيعية عند الضغط الجوي

المصطلحات العلمية

A	
<i>Area</i>	مساحة
<i>Absolute Permeability</i>	النفوذية المطلقة
<i>Approach</i>	تقريب
<i>Average</i>	متوسط
<i>Absolute Open Flow</i>	أقصى معدل للجريان المفتوح
<i>Abandonment Pressure</i>	الضغط النهائي (ضغط الهجر)
<i>Average Temperature</i>	متوسط درجة الحرارة
<i>Average Pressure</i>	متوسط الضغط
<i>Absolute Open Flow Potential</i>	أقصى معدل للجريان المفتوح
<i>Analytical Expression</i>	التعبير التحليلي
<i>Apparent Molecular Weight</i>	الوزن الجزيئي الظاهري
<i>Average of reservoir pressure</i>	متوسط ضغط المكن
B	
<i>Bottom-Hole Pressures</i>	ضغوط قاع البئر
C	
<i>Compressor</i>	ضاغط
<i>Composition</i>	التركيب
<i>Compressibility</i>	الانضغاطية
<i>Connate Water</i>	المياه المترابطة
<i>Closed Reservoir</i>	مكن مغلق
<i>Compressibility Factor</i>	عامل الانضغاط
<i>Corresponding States Law</i>	قانون الحالات المقترنة
<i>Critical</i>	الحرجة
<i>Correction for non hydrocarbon Impurities</i>	التصحيح لأجل المركبات غير الهيدروكربونية
<i>Correction Factor</i>	عامل التصحيح
<i>Constant</i>	ثابت
<i>Condensate</i>	المكثفات

<i>Critical Pressure</i>	الضغط الحرج
<i>Critical Temperature</i>	درجة الحرارة الحرجة
<i>Cumulative Gas Production</i>	الإنتاجية التراكمية من الغاز
<i>Consolidated Sandstone</i>	حجر رملي متماسك
<i>Consolidated Limestone</i>	حجر كلسي متماسك
D	
<i>Diffusivity Equation</i>	معادلة الانتشارية
<i>Dimensionless</i>	بدون أبعاد
<i>Degrees Rankin</i>	درجات رانكين
<i>Depletion</i>	استنزاف
<i>Depth</i>	العمق
<i>Diameter</i>	قطر
E	
<i>Extended Flow</i>	الجريان الموسع
<i>Expression</i>	مقدار جبري
F	
<i>Flowing Bottom Hole Pressure</i>	ضغط قاع البئر الجرياني
<i>Flow</i>	جريان
<i>Flow-After-Flow Testing</i>	اختبار معدلات الجريان المتعاقبة
<i>Fluid</i>	مائع
<i>Flow Rate</i>	معدل الجريان
<i>Figure</i>	شكل
<i>Factor</i>	عامل
<i>Forces Friction</i>	قوى الاحتكاك
<i>Flowing Tubing Pressure</i>	الضغط الجرياني لمواسير الإنتاج
<i>Flowing Tubing Temperature</i>	درجة حرارة مواسير الإنتاج الجريانية
<i>Friction Factor</i>	عامل الاحتكاك
G	
<i>Gas field Development</i>	تطوير حقل الغاز
<i>Gas Saturation</i>	درجة التشبع بالغاز

<i>Gas Formation Volume Factor</i>	عامل حجم الغاز
<i>Gas Production System</i>	منظومة إنتاج الغاز
<i>Gas Water Level</i>	خط التقاء النفط بالماء
<i>Gradient</i>	تدرج
<i>Gas Initial in Place</i>	الغاز الأولي في مكان تواجدہ
H	
<i>Horizontal</i>	أفقي
<i>Hydraulic Resistance</i>	المقاومة الهيدروليكية
I	
<i>Inflow Performance</i>	أدائية التدفق
<i>Infinite acting</i>	غير محدود
<i>Interference</i>	التداخل
<i>Isochronal Testing</i>	اختبار الفترات الزمنية المتساوية
<i>Ideal</i>	مثالي
L	
<i>Law</i>	قانون
<i>Laminar</i>	خطي (صفائحي)
<i>Layer</i>	طبقة
<i>Liquid</i>	سائل
<i>Length</i>	الطول
M	
<i>Manometer</i>	مقياس
<i>Multipoint Testing</i>	الاختبار متعدد النقاط
<i>Molecular Weight</i>	الوزن الجزيئي
<i>Mole Fraction</i>	الكسر المولي
<i>Mixture</i>	خليط
<i>Map</i>	خارطة
<i>Medis</i>	وسط
<i>Method</i>	طريقة
N	

<i>Nodal Analysis</i>	التحليل العقدي
<i>Numerical Integration</i>	التكامل العددي
<i>Noncircular Reservoir</i>	مكامن غير دائرية
O	
<i>Organic Compounds</i>	مركبات عضوية
P	
<i>Pseudo Time</i>	الزمن الزائف
<i>Pseudo Pressure</i>	الضغط الزائف
<i>Modified Pseudo Time</i>	الزمن الزائف المعدل
<i>Modified Pseudo Pressure</i>	الضغط الزائف المعدل
<i>Pressure at the External Boundary</i>	الضغط عند الحدود الخارجية
<i>Initial Pressure</i>	الضغط الأولي
<i>Pseudo Critical Pressure</i>	الضغط شبه الحرج (الحرج الزائف)
<i>Pseudo Reduced Pressure</i>	الضغط شبه المصغر (المصغر الزائف)
<i>Pseudo Critical Temperature</i>	درجة الحرارة شبه الحرجة (الحرجة الزائفة)
<i>Pseudo Reduced Temperature</i>	درجة الحرارة شبه المصغرة (المصغرة الزائفة)
<i>Modified Isochronal Testing</i>	اختبار تساوي الزمن (الاختبار المعدل)
<i>Pressure Drawdown Testing</i>	اختبار انخفاض الضغط
<i>Pressure Buildup Testing</i>	اختبار استعادة الضغط
<i>Perforating Density</i>	كثافة التنقيب
<i>Production by Water Drive</i>	الإنتاج بالدفع المائي
<i>Physical Properties</i>	الصفات الفيزيائية
<i>Porosity</i>	المسامية
<i>Practical</i>	عملي
<i>Permeability</i>	النفوذية
<i>Pseudo Steady State Flow</i>	جريان الحالة المستقرة الزائفة
<i>Paraffin Hydrocarbons</i>	هيدروكربونات بارافينية
<i>Pseudo Critical</i>	شبه حرجة (حرجة زائفة)
<i>Production</i>	إنتاج

<i>Porous Media</i>	الوسط المسامي
R	
<i>Radial Flow</i>	الجريان الشعاعي
<i>Real Gas Pseudo Pressure Analysis</i>	التحليل باستخدام الضغط الزائف للغاز الحقيقي
<i>Reserve</i>	الاحتياطي
<i>Reservoir Performance</i>	أداءية المكن
<i>Rocks</i>	صخور
<i>Real Gas</i>	الغاز الحقيقي
<i>Reduced Value</i>	القيمة المصغرة
<i>Reservoir and Piping System</i>	منظومة المكن والأنابيب
<i>Reduced Pressure</i>	الضغط المصغر
<i>Reduced Temperature</i>	درجة الحرارة المصغرة
<i>Reynolds Number</i>	عدد رينولدز
<i>Relative Roughness</i>	الخشونة النسبية
S	
<i>Salinity</i>	الملوحة
<i>Static Bottom Hole Pressure</i>	ضغط قاع البئر الساكن
<i>Static Tubing Pressure</i>	الضغط الساكن لمواسير الإنتاج
<i>Separator Pressure</i>	ضغط الفاصل
<i>Semi-Steady</i>	شبه مستقر
<i>Semi-Log</i>	نصف لوغاريتمي
<i>Stabilization Time</i>	زمن الاستقرار
<i>Steady State Flow</i>	جريان الحالة المستقرة
<i>Skin Factor</i>	عامل الظاهرة السطحية
<i>Stabilized Deliverability Curve</i>	منحني التصريف المستقر
<i>Standard Conditions</i>	الشروط القياسية
<i>Solid</i>	صلب
<i>Static Tubing Temperature</i>	درجة حرارة مواسير الإنتاج الساكنة
<i>Slope</i>	الميل
T	

<i>Total System</i>	المنظومة الكلية
<i>Tubing</i>	مواسير الإنتاج
<i>Transient Tests</i>	الاختبارات الانتقالية
<i>Turbulence Coefficient</i>	معامل الاضطراب
<i>Table</i>	جدول
<i>Test</i>	اختبار
<i>Thickness</i>	السماكة
U	
<i>Unsteady State</i>	الحالة غير المستقرة
<i>Limits</i>	حدود
<i>Unconsolidated Sandstone</i>	حجر رملي غير متماسك
<i>Unlaminar</i>	غير خطي
V	
<i>Volumetric Method</i>	الطريقة الحجمية
<i>Viscosity</i>	اللزوجة
<i>Velocity Coefficient</i>	معامل السرعة
<i>Valve</i>	صمام
<i>Vertical</i>	عمودي
W	
<i>Well Head Pressure</i>	ضغط رأس البئر
<i>Water Encroachment</i>	التعدي المائي
<i>Water Drive</i>	دفع الماء
<i>Water Injection</i>	حقن الماء
<i>Water Coning</i>	تقمع الماء

المراجع العلمية

باللغة العربية:

- ١- ف.مورافيوف، 1980- استغلال آبار البترول والغاز. دار مير للطباعة والنشر - موسكو، (523) صفحة.
- ٢- زاكيروف - نيدرا، 1989- نظرية وتخمين استثمار المكامن الغازية والغازية الكوندنساتية. دار مير للطباعة والنشر - موسكو، (343) صفحة.
- ٣- العطار، حازم، 1992- عمليات إنتاج الغاز. منشورات جامعية - جامعة بغداد، العراق، (571) صفحة.
- ٤- عبد الأحد، جورج - نوفل، عماد، 1995- هيدروليك الموائع الجوفية. مديرية الكتب والمطبوعات - جامعة البعث، حمص، (190) صفحة.
- ٥- عبد الأحد، جورج، 1998- فيزياء الطبقة النفطية والغازية، الجزء الأول. مديرية الكتب والمطبوعات - جامعة البعث، حمص، (202) صفحة.

باللغة الإنكليزية:

- 6- L.p.Dake, 1988- **Fundamentals of Reservoir Engineering**. Amsterdam, Netherlands,(438)P.
- 7- CHI U.Ikoku, 1992- **Natural Gas Reservoir Engineering**. Krieger Publishing Company Malbar, Florida,(503)P.
- 8- Roland.N.Horne,1995- **Modern Well Test Analysis**. Second Edition , Published by Petroway.Ins "Society of Petroleum Engineers" ,Dallas, TX, USA,(255)P.
- 9- John Wiley-Sons, 1998- **Well Testing**. Third Edition, Schlumberger Educational Services,(865)P.
- 10- Michael J.Economides-Kenneth G.Nolte, 2000-**Reservoir Stimulation**. First Edition, Schlumberger Educational Services,(710)P.
- 11- Schlumberger ,**Well Test Interpretation**,2002- Schlumberger website: <http://www.slb.com>
- 12-Amanat U.Chaudhry,2003- **Gas Well Testing**.(841)P
Syrian Arab Republic